



**SAVONIA**

**Tekniikka**

Palopäällystön koulutus

**OPINNÄYTETYÖ**

**TULIPALON VAIKUTUS POISTUMISTURVALLISUUTEEN  
LOUHINTAVAIHEESSA OLEVASSA UMPIPERÄTUNNELISSA**

Ahokas Nino

23.2.2017 

**SAVONIA-AMMATTIKORKEAKOULU - TEKNIikka, KUOPIO**

Koulutusohjelma

Palopäällystön koulutusohjelma

Tekijä

Nino Ahokas

Työn nimi

Tulipalon vaikutus poistumisturvallisuuteen louhintavaiheessa olevasta umpiperätunnelista

Työn laji

Päiväys

Sivumäärä

Opinnäytetyö

18.2.2017

51

Työn valvoja

Yrityksen yhdyshenkilö

vanhempi opettaja Kimmo Vähäkoski

johtava palotarkastaja Janne Rautasuo

Yritys

Länsi-Uudenmaan pelastuslaitos

Tiivistelmä

Tämä opinnäytetyö oli toiminnallinen, ja opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia poistumisturvallisuutta louhintavaiheessa olevasta umpiperätunnelista tulipalon aikana. Tutkimus toteutettiin mallintamalla tulipalo ja poistuminen umpiperätunnelista palo- ja poistumissimulointiohjelmalla Fire Dynamics Simulation + Evacuation. Simulointi tehtiin yhteistyössä Aalto-yliopiston kanssa.

Työn tuloksia käytetään hyödyksi Länsi-Uudenmaan pelastuslaitoksen alueella tunnelityömaiden turvallisuutta arvioitaessa. Tuloksilla voitiin osoittaa, että tunnelityömaat ovat poistumisturvallisuuden ja pelastustoiminnan kannalta tavanomaista vaativampia kohteita. Lisäksi simuloinnin tuloksia on verrattu tunnelityömaiden todellisiin olosuhteisiin.

Tutkimuksen tulosten perusteella henkilöturvallisuus vaarantuu silloin, kun henkilöt ovat palavan kohteen ja tunnelin perän välillä. Palon aiheuttama lämpösäteily estää palopaikan ohittamisen, jolloin poistuminen ei todennäköisesti onnistu ja henkilöt jäävät loukuun palopaikan taakse. Huomion arvoiseksi seikoiksi tutkimuksessa nousivat myös etäisyys palopaikasta ja poistumisajat.

Avainsanat

Umpiperätunneli, poistumisturvallisuus

Luottamuksellisuus

julkinen

**SAVONIA UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES**

Degree Programme

**Fire Officer (Engineer)**

Author

**Nino Ahokas**

Title of Project

**Evacuation safety of dead end tunnels under construction during fire**

Type of Project

**Final Project**

Date

**18 February, 2017**

Pages

**51**

Academic Supervisor

**Mr Kimmo Vähäkoski, Senior Instructor**

Company Supervisor

**Mr Janne Rautasuo, Leading Fire Inspector**

Company

**Länsi-Uusimaa Rescue Department**

Abstract

This final project was a functional project. The aim was to study how evacuation safety is carried out in case of a fire when a tunnel is in the construction phase before a break through inside the tunnel.

The study was carried out with Fire Dynamics Simulation + Evacuation program in co-operation with Aalto University, Helsinki. The Simulations covered three different scenarios of fire and evacuation situations. Heat release rates of a front wheel loader and drilling rig were used as default values of the designed fires as these are commonly used at this type of underground tunnel construction sites.

The results of this study show that the safety of evacuation depends on where the person is located when the fire starts and when evacuation times from the tunnels are quite long. If the person is between the accident scene and the far end of the tunnel the possibility to survive depends on the distance of the person to the fire.

Keywords

**dead end tunnels under construction, Evacuation safety**

Confidentiality

**public**

## ALKUSANAT

Haluan kiittää kotiväkeä ymmärryksestä ja jaksamisesta opiskeluaikana. Lisäksi kiitokset kuuluvat opinnäytetyön ohjaajilleni, johtava palotarkastaja Janne Rautasuolle ja vanhempi opettaja Kimmo Vähäkoskelle. Haluan vielä kiittää seuraavia henkilöitä:

- Simo Hostikka, apulaisprofessori, Aalto-yliopisto
- Panu Oikkonen, työmaamestari, Kalliorakennus- Yhtiöt Oy
- Niko Kauranen, kurssiopiskelija, Aalto-yliopisto.

Hostikan avulla löysimme simulaatiotyölle tekijän nopeasti hänen FDS+Evac-simulaatio kurssiopiskelijoiden joukosta. Oikkosen avulla pääsin ymmärrykseen siitä, millainen ympäristö louhintavaiheessa oleva tunneli on. Oikkonen on tarjonnut auliisti asiantuntemustaan kaikissa tämän työn vaiheissa. Kaurasen kanssa projektiyhteistyö simuloinnin parissa oli mutkatonta, mielenkiintoista ja opettavaista.

Espoossa 18.02.2017

Nino Ahokas

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	9
2	KESKEISET LAIT JA ASETUKSET	12
2.1	Pelastuslaki 379/2011	12
2.2	Pelastusviranomaisen valvontatoiminta louhintatyömaalla	13
2.3	Työturvallisuuslaki 738/2002	14
2.4	Valtioneuvoston asetus räjäytys- ja louhintatyön turvallisuudesta 644/2011	14
3	TUNNELITYÖMAAN OLOSUHTEET	16
3.1	Maanalaisten umpiperätunnelien olosuhteet	16
3.2	Työturvallisuus louhintavaiheen aikana	16
3.3	Työkoneiden palotehot	18
4	TUTKIMUSMENETELMÄT	21
4.1	Tutkimusongelma	21
4.2	FDS+Evac tulipalon simulointiohjelma	22
4.3	Simuloidun umpiperätunnelin tiedot	23
4.4	Mitoituspalot	23
5	SIMULAATIOIDEN TULOKSET	26
5.1	Poistumistilanne Case 1 – Porausjumbo	27
5.2	Poistumistilanne Case 2 – Pyöräkuormaaja	27
5.3	Poistumistilanne Case 3 – Pyöräkuormaaja	29
6	POISTUMISEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	31
6.1	Palokaasujen myrkyllisyys	32
6.2	Savun leviämisenopeus tunnelissa	33

6.3	Poistumisnopeus ja savun leviämismisnopeus	35
6.4	Kriittiset olosuhteet	36
6.5	Henkilömäärät tunnelissa näkyvyyden ollessa alle 3 metriä	37
6.6	Lämpötila tunnelissa	40
7	POHDINTA	43
7.1	Yhteenveto	43
7.2	Tavoitteen saavuttaminen	45
7.3	Oma oppiminen	46
7.4	Jatkotutkimusaiheita	48
	LÄHTEET	49

## Käsitteitä

*FED-arvo (Fractional Effective Dose).* FED-arvolla mitataan tulipalon vapauttamia happea syrjäyttäviä myrkyllisiä kaasuja kuten CO (hiilimonoksidi), HCN (syaanivety), CO<sub>2</sub> (hiilidioksidi). FED-arvon ollessa 1 katsotaan, että palamiskaasuilla on vakavasti haittaavia vaikutuksia puolelle palokaasuille altistuvista henkilöistä. Herkemmin reagoivan väestöosan, kynnysarvona voidaan pitää 0,3. (Weckman, H. 2005, 45; Kauranen, N. 2016, 33).

*FDS + Evac.* Fire Dynamics Simulator with Evacuation, FDS+Evac on palon ja poistumisen mallintamisessa käytetty tietokonesimulaatio-ohjelma, jota VTT kehittää yhteistyössä ulkomaisten toimijoiden kanssa.

*HIKLU.* Lyhennettä käytetään Helsingin, Itä-Uudenmaan, Keski-Uudenmaan ja Länsi-Uudenmaan pelastuslaitosten yhteisestä työryhmästä, joka laatii alueelle yhteisiä ohjeistuksia.

*Hilakoko.* FDS-palonsimulointiohjelmassa piirretty 3-mallinnus täytetään hiloilla, jotka ovat kuutioita. Hilakoko ilmoitetaan sivunpituus \* sivunpituus \* sivunpituus senttimetreinä.

*Lämpösäteily.* Liekin aiheuttama lämpösäteily ilmaistaan kilowatteina neliometriä kohden (kW/m<sup>2</sup>).

*Palokuorma (MJ/kg).* Energian määrä yhdessä kilogrammassa ainetta. Palokuorman yksikkönä käytetään Joulea.

*Porausjumbo.* Louhintatyössä kallion porauksessa käytetty työkone, jolla porataan kallioon reikiä räjäytystyötä varten.

*Paloteho (MW).* Palossa vapautuva lämpöenergia (J) aikayksikköä kohti. Paloteho (Q) ilmoitetaan megawatteina (MW).

*Palosimulointi.* Tulipalon mallintaminen palonsimulointiohjelmalla Fire Dynamics Simulation (FDS + Evac).

*Pyöräkuormaaja.* Louhintatyömaalla käytetty työkone, jolla siirretään räjäytetty kiviaines kuorma-autojen kyytiin pois vietäväksi. Käytössä on yleisesti Caterpillar 980-tyyppinen pyöräkuormaaja.

*Umpiperätunneli.* Tunneli, josta ei ole sisäänkäynnin, tunnelin suuaukon, lisäksi toista uloskäyntiä.



## 1 JOHDANTO

Rakennuksia suunniteltaessa on huomioitava monia turvallisuuteen liittyviä seikkoja, joilla parannetaan henkilöturvallisuutta rakennuksen käytön aikana. Rakennus on suunniteltava ja toteutettava niin, että poistuminen rakennuksesta onnettomuustilanteessa on mahdollista ennen, kuin olosuhteet muuttuvat henkilöturvallisuuden kannalta kriittisiksi. Rakennusvaiheessa olevissa rakennuksissa ei ole aina mahdollista ylläpitää samanlaista turvallisuustasoa eri rakennusvaiheiden aikana kuin valmiissa rakennuksessa.

Valmiissa maanalaisessa tunnelissa on otettu huomioon käyttäjien poistumisturvallisuus onnettomuustilanteessa. Kun poistumismatka on pitkä, poistumisturvallisuutta voi parantaa erilaisilla rakenneratkaisuilla ja laitteilla kuten savunpoistokuiluilla, palo-osastoilla, savuverhoilla ja savunpoistopuhaltimilla. Tunnelin rakennusvaiheessa työntekijöiden poistumisturvallisuus ei ole samalla tasolla kuin valmiissa tunnelissa, koska kaikki edellä mainitut turvallisuutta lisääviä rakenneratkaisuja ja laitteita ei vielä ole.

Tunnelin rakentamisessa erityisen riskialtis vaihe on silloin, kun louhinnassa ollaan vielä niin sanottu umpiperävaiheessa. Umpiperävaiheessa tunneliin ei ole muita kulkuteitä maan pinnalle kuin tunnelin suuaukko. Tämä vaihe on työntekijöiden poistumisturvallisuuden kannalta iso riskitekijä. Tulipalo tai jokin muu onnettomuus voi johtaa siihen, että olosuhteet tunnelissa muuttuvat hengenvaarallisiksi. Erityisesti tulipalotilanteessa kuumuus, myrkylliset savukaasut ja näkyvyyden heikkeneminen ovat sellaisia tekijöitä, jotka vaikeuttavat ja jopa estävät työntekijöiden poistumisen tunnelista. Tässä työssä tutkitaan työntekijöiden poistumisturvallisuutta louhintavaiheessa olevasta tunnelista tulipalon aikana.

### Aiheen valinta

Länsi-Uudenmaan pelastuslaitoksen alueella on runsaasti maanalaisia tiloja rakenteilla sekä suunnitteilla, erityisesti erilaisia tunneleita. Tunnelin louhinnan aikana on työmaalla vaihe, jossa tunneli on niin sanottu umpiperätunneli. Tällaisesta tunnelista ei ole muuta poistumistietä kuin tunnelin suuaukko. Tämä vaihe on erityisen riskialtis työntekijöiden poistumisturvallisuuden kannalta. Pahin mahdollinen skenaario on, että työntekijöitä jää loukkuun tunneliin tulipalon taakse tunnelin suuaukkoon nähden. Länsi-

Uudenmaan pelastuslaitoksella ei ole ollut riittävästi tämänlaisesta tilanteesta tutkittua tietoa, jonka perusteella voitaisiin opastaa tunneliurakoitsijoita varautumaan tulipalojen varalta louhintatyön aikana.

Työn tekemisen mahdollistaa yhteistyö Aalto-yliopiston kanssa. Aalto-yliopisto tarjosi mahdollisuuden simuloida poistumista umpiperätunnelista simulointiohjelman avulla oppilastyönä. Työn tekeminen tarjoaa myös mielenkiintoisen näkökulman tutustua tulipalon ja poistumisen mallintamiseen simuloinnin avulla. Nykypäivänä palo- ja poistumissimulointeja käytetään rakennusten suunnittelussa apuna, kun arvioidaan palo- ja poistumisturvallisuuden tasoa rakennuksissa.

Espoossa 2013 tapahtui Karhusaaren Länsimetron tunnelityömaalla maastohenkilöauton tulipalo umpiperätunnelissa. Työntekijät olivat ajaneet maastohenkilöautolla 50 metrin päähän tunnelin perältä tarkoituksenaan aloittaa panostustyöt tunnelin perällä. Pinnalta tunnelin perälle, johon he jättivät ajoneuvon, oli matkaa 1070 metriä. Mukanaan heillä oli louhinnassa käytettäviä räjähteitä, jotka he nostivat pois ajoneuvon kyydistä. Tämän jälkeen työntekijät poistuivat ajoneuvon luota ja menivät tunnelin perälle töihin. Työskenneltyään jonkin aikaa työntekijät haistoivat savunhajun ja alkoivat tutkia, mistä haju on peräisin. Työntekijät huomasivat maastohenkilöauton palavan, ja savun muodostus oli jo siinä vaiheessa niin voimakasta, että he joutuivat konttaamaan ajoneuvon ohi, koska savuraja oli jo alle 2 metrin korkeudella. Työntekijät poistuivat tunnelista ja samalla tarkastivat tiloja ja varoittivat muita työntekijöitä. Päästyään pinnalle he tekivät hälytyksen työnjohtajan välityksellä hätäkeskukseen. Pelastuslaitokselle jäi käytännössä vain sammutustehtävä, koska tunnelissa ei ollut enää työntekijöitä. (LUP 2013).

Karhusaarella tapahtuneen tulipalon jälkeen Länsi-Uudenmaan pelastuslaitos laati menetelmäohjeen rakenteilla olevan tunnelin tulipaloihin. Helsingin, Itä-Uudenmaan, Keski-Uudenmaan ja Länsi-Uudenmaan pelastuslaitosten yhteinen työryhmä, myöhemmin HIKLU, alueella on pelastuslaitosten kesken yhteistyössä tehty menetelmäohje tulipaloihin, joissa joudutaan tekemään vaativaa savusukellusta kuten maanalaisissa tiloissa. Menetelmäohje on tarkoitettu vaativien savusukellustilanteiden hoitamiseen turvallisesti. Vaativasavusukellustilanne vaatii erityisiä järjestelyjä, ja näiden järjestelyjen toteuttaminen vaatii aikaa normaalia savusukellustilannetta enemmän. Tästä syystä pelastus-

toimet eivät käynnisty niin nopeasti kuin tavanomaisessa tilanteessa. Lisäksi maan-alainen kohde pidentää pelastustoimen tehokkaan pelastustoiminnan aloittamisaikaa.

Tässä työssä tutkitaan henkilöiden poistumismahdollisuuksia umpiperätunnelissa tapahtuvan tulipalon aikana. Umpiperätunnelityömaan louhintavaiheen aikana työmaalla ei ole kuin yksi reitti ulos, tunnelin suuaukko. Työssä ei oteta kantaa miten, poistumisturvallisuutta voi parantaa vaan se on rajattu pois. Simuloinnin valmistumisen määräaika Aalto-yliopistolta oli 13.4.2016, ja näin ollen työn aloituksesta simuloinnille jäi aikaa käytännössä yksi kuukausi.

Työ koostuu seuraavista osa-alueista: taustatiedosta, tunnelityömaiden olosuhteista, tutkimusmenetelmästä, tutkimuksen tuloksista, poistumisturvallisuuteen vaikuttavista tekijöistä ja pohdinnasta joka sisältää yhteenvedon työn tuloksista.

## 2 KESKEISET LAIT JA ASETUKSET

### 2.1 Pelastuslaki 379/2011

Pelastuslain 4 pykälän mukaan jokaisen on oltava huolellinen tulipalon tai muun onnettomuuden vaaran ja vahingon välttämiseksi. Pykälä velvoittaa kaikkia huolehtimaan määräysvaltansa piirissä siitä, että henkilöturvallisuus ei vaarannu ja annettuja säännöksiä sekä määräyksiä noudatetaan. Tämä pykälä ei erittele, onko kyseessä työmaa vai rakennus. (Pelastuslaki 379/2011, 4 §)

Pelastuslain 379/2011 15 pykälän mukaan kohteeseen on laadittava pelastussuunnitelma silloin, kun kohde on poistumisturvallisuuden tai pelastustoiminnan kannalta tavanomaista vaativampi.

Pelastuslain 42 pykälän perusteella pelastusviranomaisen tulee toimia yhteistyössä muiden viranomaisten ja alueen asukkaiden sekä yhteisöjen kanssa. Louhintatyömaiden osalta yhteistyöviranomainen on Aluehallintovirasto (AVI), joka valvoo työmaiden osalta työturvallisuuslain velvoitteiden toteutumista.

Pelastuslain 43 pykälä velvoittaa pelastuslaitosta seuraamaan onnettomuusuhkien kehitystä alueellaan ja niistä tehtävien johtopäätösten perusteella ryhtyä osaltaan toimenpiteisiin onnettomuuksien ehkäisemiseksi. Tämä työ tukee osaltaan onnettomuusuhkien kehityksen seurantaa ja niiden vaikutusten arviointia.

Pelastuslain 78 pykälä velvoittaa pelastusviranomaista valvomaan Pelastuslain 2. ja 3. luvun säännösten noudattamista alueellaan palotarkastuksia tekemällä. Luvusta 2 nousee esiin neljäs pykälä, joka käsittelee huolellisuusvelvoitetta ja sitä, että jokaisen on mahdollisuuksiensa mukaan valvottava, että hänen määräysvaltansa piirissä noudatetaan tulipalon ja muun onnettomuuden ehkäisemiseksi ja henkilöturvallisuuden varmistamiseksi annettuja säännöksiä ja määräyksiä. (Pelastuslaki 379/2011, 78 ja 4 §.)

Pelastuslain 79 pykälän mukaan pelastuslaitoksen on laadittava valvontasuunnitelma ja tehtävä riskienarviointi, joihin valvontatoimet perustuvat. Valvontatoimilla pyritään ehkäisemään onnettomuuksien syntyminen.

Pelastuslain 80 pykälän mukaan palotarkastus voidaan tehdä kohteissa ja kohteen edustajan on esitettävä säädöksissä vaaditut suunnitelmat ja järjestelyt. Pelastuslain 15 pykälän mukainen pelastussuunnitelma lukeutuu näihin suunnitelmiin ja asiakirjoihin.

Pelastuslain 81 pykälän perusteella pelastusviranomainen voi keskeyttää toiminnan harjoittamisen silloin, kun toiminta aiheuttaa vakavaa vaaraa henkilöturvallisuudelle, ja pelastusviranomainen voi määrätä puutteet korjattaviksi. Jos puutteita ei voi heti korjata, pelastusviranomaisen on ilmoitettava puutteista asianomaiselle valvontaviranomaiselle, tässä tapauksessa Aluehallintovirastolle.

Edellä mainittujen pykälien perusteella pelastusviranomainen saa mahdollisuuden pelastuslain 82 pykälän perusteella vaatia kohdetta hankkimaan laitteita, joilla henkilöiden turvallisuutta voidaan parantaa, silloin kun, kohde jossa harjoitettu toiminta tai olosuhteet aiheuttavat henkilö- tai paloturvallisuudelle tai ympäristölle tavanomaista suuremman vaaran. Alueen pelastusviranomainen voi, jos se on välttämätöntä, määrätä toiminnanharjoittajan hankkimaan tarkoituksenmukaista sammutuskalustoa ja muita pelastustyötä helpottavia laitteita tai asentamaan automaattisen sammutuslaitteiston taikka ryhtymään kohteessa muihin välttämättömiin toimenpiteisiin onnettomuuksien ehkäisemiseksi sekä ihmisten ja omaisuuden turvaamiseksi onnettomuuden varalta.

## 2.2 Pelastusviranomaisen valvontatoiminta louhintatyömaalla

Pelastusviranomainen valvoo pelastuslain noudattamista palvelutasopäätöksessä vahvistetun valvontasuunnitelman mukaisin valvontatoimin alueellaan. Valvontatoimintaa ei yleensä tehdä työmailla vaan pääsääntöisesti pelastusviranomaisen tekemä valvonta kohdistuu olemassa oleviin rakennuksiin ja niissä harjoitettavaan toimintaan. Suurissa pelastustoimelle haastavissa työmaakohteissa voidaan kuitenkin tehdä valvontaa, joka on määritetty valvontasuunnitelmassa. Näissä tilanteissa pelastusviranomaisen tekemä valvonta on voitu määrittää erikseen rakennusluvassa. Tämänlaisia työmaakohteita ovat maanalaiset ja korkeat vaikeasti tavoitettavat kohteet. Näissä kohteissa pelastusviranomainen valvoo palotarkastuksilla erityisesti pelastustoiminnan toimintaedellytyksien toteutumista työmaavaiheen aikana. Mahdollisiin havaittuihin puutteisiin puututaan ja niistä ilmoitetaan valvovalle viranomaiselle eli Aluehallintovirastolle.

### 2.3 Työturvallisuuslaki 738/2002

Työturvallisuuslaki velvoittaa työnantajaa tekemään selvityksen työnvaaroista ja arvioimaan niiden vaikutusta työturvallisuuteen ja tarvittaessa poistamaan ne tai arvioimaan niiden vaikutusta työntekijöiden turvallisuudelle ja terveydelle. Lain kohta 10 § Työn vaarojen selvittäminen ja arviointi sanoo seuraavaa:

- *”Työnantajan on työn ja toiminnan luonne huomioon ottaen riittävän järjestelmällisesti selvitettävä ja tunnistettava työstä, työtilasta, muusta työympäristöstä ja työolosuhteista aiheutuvat haitta- ja vaaratekijät sekä, milloin niitä ei voida poistaa, arvioitava niiden merkitys työntekijöiden turvallisuudelle ja terveydelle. Tällöin on otettava huomioon muun ohella:*
- *tapaturman ja muu terveyden menettämisen vaara kiinnittäen huomiota erityisesti kyseisessä työssä tai työpaikassa esiintyviin 5 luvussa tarkoitettuihin vaaroihin ja haittoihin;”*

Aluehallintoviraston työsuojelun vastuualue valvoo työturvallisuuslakia 738/2002 ja tässä laissa määriteltyjen asetuksien vaatimusten toteutumista louhintatyömailla sekä valtioneuvoston asetusta räjäytys- ja louhintatyön turvallisuudesta 644/2011.

### 2.4 Valtioneuvoston asetus räjäytys- ja louhintatyön turvallisuudesta 644/2011

Valtioneuvoston asetus räjäytys- ja louhintatyön turvallisuudesta 644/2011 ohjeistaa maanalaisten tilojen rakennuttajia huolehtimaan riittävästä työntekijöiden turvallisuudesta. Asetus velvoittaa (3 § Turvallisuussuunnitelma) työnantajaa tekemään räjäytys- ja louhintatyötä varten työturvallisuuslain 738/2002 10 §:n 1 momentissa tarkoitetun työn ja työympäristön vaarojen selvittämisen ja arvioinnin perusteella työpaikka- ja työvaihekohtaisesti tarkentuva kirjallisen turvallisuussuunnitelman. (Työturvallisuuslaki 738/2002, 10 §.)

Valtioneuvoston asetus räjäytys- ja louhintatyön turvallisuudesta 644/2011 velvoittaa urakoitsijoita laatimaan turvallisuussuunnitelman onnettomuuksien varalta. Seuraavassa on ote asetuksen kohdasta 3 § Turvallisuussuunnitelma:

- ”Työnantajan on räjäytys- ja louhintatyötä varten tehtävä työturvallisuuslain (738/2002) 10 §:n 1 momentissa tarkoitetun työn ja työympäristön vaarojen selvittämisen ja arvioinnin perusteella työpaikka- ja työvaihekohtaisesti tarkentuva kirjallinen turvallisuussuunnitelma.
- Turvallisuussuunnitelmasta tulee tarpeellisessa laajuudessa ilmetä turvallisuuden varmistamiseksi tehtävät toimenpiteet ja ohjeet seuraavista asioista:  
..
- 3) kulkuväylät, poistumisreitit ja suojapaikat;  
..
- 7) hätätilanteista pelastautuminen ja pelastautumislaitteen tarve; sekä  
..”.

Valtioneuvoston asetus räjäytys- ja louhintatyön turvallisuudesta 644/2011 23 § Pelastautumisen järjestäminen ohjeistaa seuraavaa:

- ”Työnjohdon ja työntekijän välillä on oltava yhteydenpito- ja varoitusjärjestelmä, jolla voidaan varmistaa työntekijän sijainti.
- Pitkäkestoisessa louhinnassa on järjestettävä varapoistumistie turvallisuussuunnitelman mukaisesti. Jos kulkemiseen tarvitaan huomattavaa fyysistä ponnistusta, toinen kulkuyhteys on järjestettävä kuljetuslaitteella.
- Pitkäkestoisiin louhintakohteisiin on järjestettävä asianmukaiset palonkestävät suojapaikat. Suojapaikassa tai muussa maanalaisessa tilassa on oltava riittävästi asianmukaisia paineilmasäiliöitä ja niiden käyttöön perehtyneitä henkilöitä.
- Maanalaisessa tilassa työskentelevällä on oltava mukanaan henkilökohtainen pelastautumislaitte, joka mahdollistaa onnettomuuden sattuessa pääsyn 3 momentissa tarkoitettuun tilaan tai maan pinnalle, jollei turvallisuussuunnitelmasta muuta johdu.
- Pelastautumista ja pelastautumisvälineiden käyttöä on tarpeellisessa laajuudessa harjoitettava säännöllisin väliajoin. Vähintään yksi harjoitus on järjestettävä, jos työn arvioidaan kestävän yli puoli vuotta.”.

### 3 TUNNELITYÖMAAN OLOSUHTEET

#### 3.1 Maanalaisten umpiperätunnelien olosuhteet

Louhintavaiheen aikana umpiperätunneleissa kaikki kulku työkohteille tapahtuu vain tunnelin suuaukon kautta. Tunneli toimii siis ajoväylänä, kävelyväylänä ja tarvittaessa poistumistienä. Louhinnan aikana tunneleissa ei ole valaistusta. Työt tehdään siirrettävien valaisimien, ajoneuvon valaisimien tai henkilökohtaisen valaisimen valon varassa (Valtioneuvoston asetus räjäytys- ja louhintatyön turvallisuudesta 644/2011, 19 §).

Ilmanvaihto tunneleissa on järjestetty siten, että tunnelin suulta puhallin puhalttaa ulkoilmaa tuuletuslinjaa pitkin tunnelin perälle 60 m<sup>3</sup>/s teholla. Tuuletuslinja on PVC-pinnoitettua polyesterikudosta, jonka käyttölämpötila on -40 - +70 celsiusastetta. Tuuletuksella pyritään pitämään tunnelin hengitysilma vähintään 18 tilavuusprosentin tasolla. (Valtioneuvoston asetus räjäytys- ja louhintatyön turvallisuudesta 644/2011, 21 §; Kaliorakennus- Yhtiöt Oy, 2016. *Tuuletussuunnitelma.*).

#### 3.2 Työturvallisuus louhintavaiheen aikana

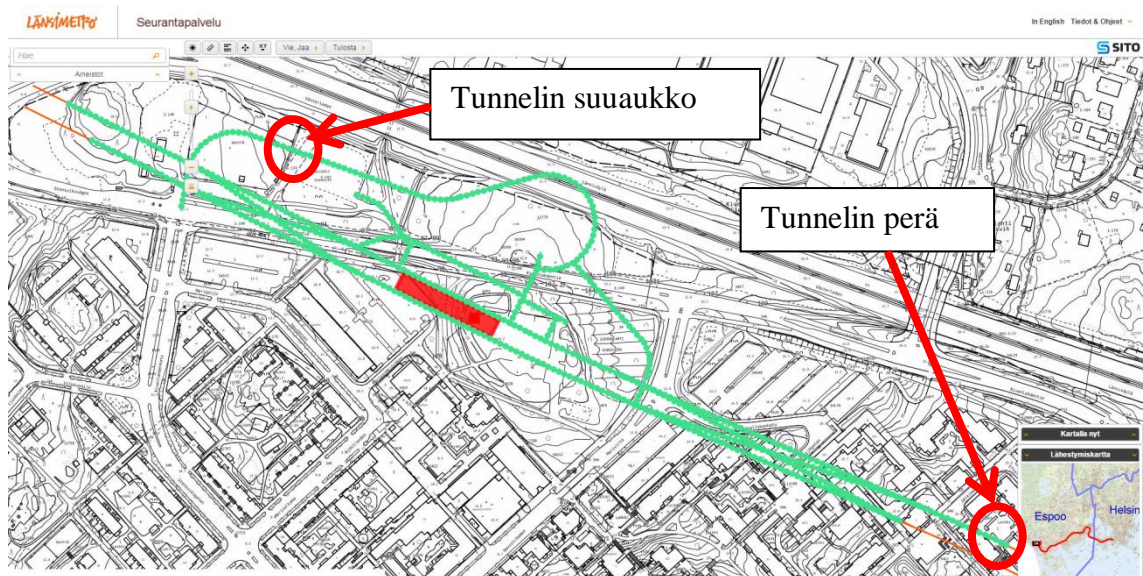
Valtioneuvoston asetus räjäytys- ja louhintatyön turvallisuudesta 644/2011, 23 § mukaan työntekijällä tulee olla mukanaan henkilökohtaiset suojavälineet. Näiden lisäksi jokaisella maanalaisessa tilassa työskentelevällä on oltava mukanaan henkilökohtainen pelastautumislaitte, jonka avulla henkilö pääsee turvalliseen tilaan tai maan pinnalle.

Tunneleissa käytettävissä työkoneissa on varattu tutustumiskäyntien perusteella vähintäänkin yksi käsisammutin tulipalon varalle. Lisäksi Jumboissa on kiinteä sammutusjärjestelmä asennettuna, se toimii käsilaukaisulla tai automaattisesti. Muissa työkoneissa ei ole pääsääntöisesti kiinteitä sammutusjärjestelmiä.

Tulipalosta varoittaminen tulisi asetuksen mukaan hoitaa niin, että varoitus havaitaan tehokkaasti koko työpaikalla. Tutustumiskäyntien perusteella louhintavaiheessa ei ole käytössä järjestelmää, jolla voitaisiin varoittaa tehokkaasti kaikkia työntekijöitä tunnelissa onnettomuustilanteessa. (Valtioneuvoston asetus räjäytys- ja louhintatyön turvallisuudesta 644/2011, 26 §).



Työturvallisuuslaki 738/2002 vaatii, että henkilöturvallisuus huomioidaan poistumisturvallisuudessa. Lähtökohtaisesti edellä mainittujen lakien ja asetusten perusteella työturvallisuuden pitäisi olla sellaisella tasolla, että toiminta ei vaaranna poistumisturvallisuutta. Todellisuudessa kuitenkin louhitaan hyvinkin pitkiä, yli 1000 -metrisiä umpiperätunnelleita, joissa ei ole kuin yksi reitti ulos. Vaihtoehtoista reittiä tai mahdollisuutta siirtyä toiselle poistumisalueelle ei ole. Esimerkiksi Espoossa Kivenlahden metrotunnelit ovat jo 800 metriä pitkiä umpiperiä, kuva 1. Suojatilan käyttö mahdollistaisi vaihtoehtoisen pelastautumisen onnettomuustilanteessa. Urakoitsijat ovat omien havaintojen mukaan pääsääntöisesti hyvin hoitaneet tarvittavien henkilösuojainten ja pelastautumisvälineiden tarjonnan työntekijöilleen.



Kuva 1. Havainne kuva Kivenlahden tunnelityömaasta. Louhittu tunneliverkosto on merkitty vihreällä. Tunnelin pituus tunnelin suulta molempiin suuntiin umpiperiin on noin 800 metriä. (Länsimetro).

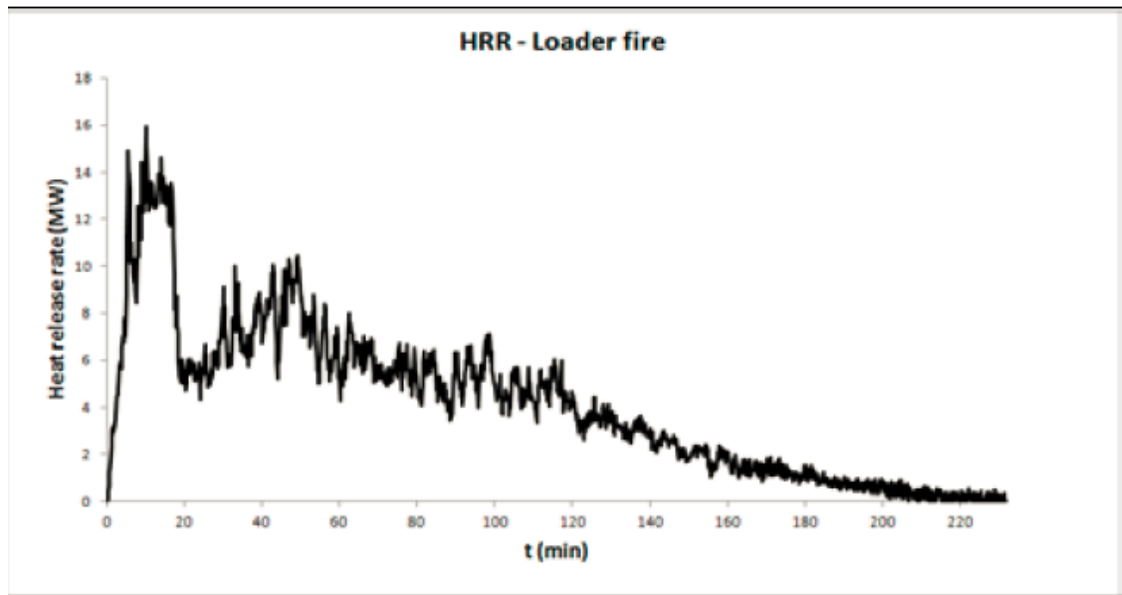
Tutustumiskäynnin perusteella louhintaurakoitsijat perehdyttävät työntekijänsä, ennen kuin nämä aloittavat työt. Perehdytys sisältää turvallisuussuunnitelman läpikäymisen ja toimintaohjeet hätätilanteissa sekä henkilökohtaisen pelastautumislaitteen käytön. Kaliorakennus- Yhtiöt Oy:llä on käytössään henkilökohtaisena pelastautumisvälineenä Sundström Escape hood SR 77-2 SMOKE/CHEM, joka antaa noin 30 minuutin suojan savukaasujen myrkyjä vastaan ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HCN}$ ). Kuva 2 havainnollistaa minkälainen kyseisen henkilökohtainen pelastautumislaitte on.



Kuva 2. Sundström Escape hood SR 77-2 SMOKE/CHEM. (Sundström, 2016).

### 3.3 Työkoneiden palotehot

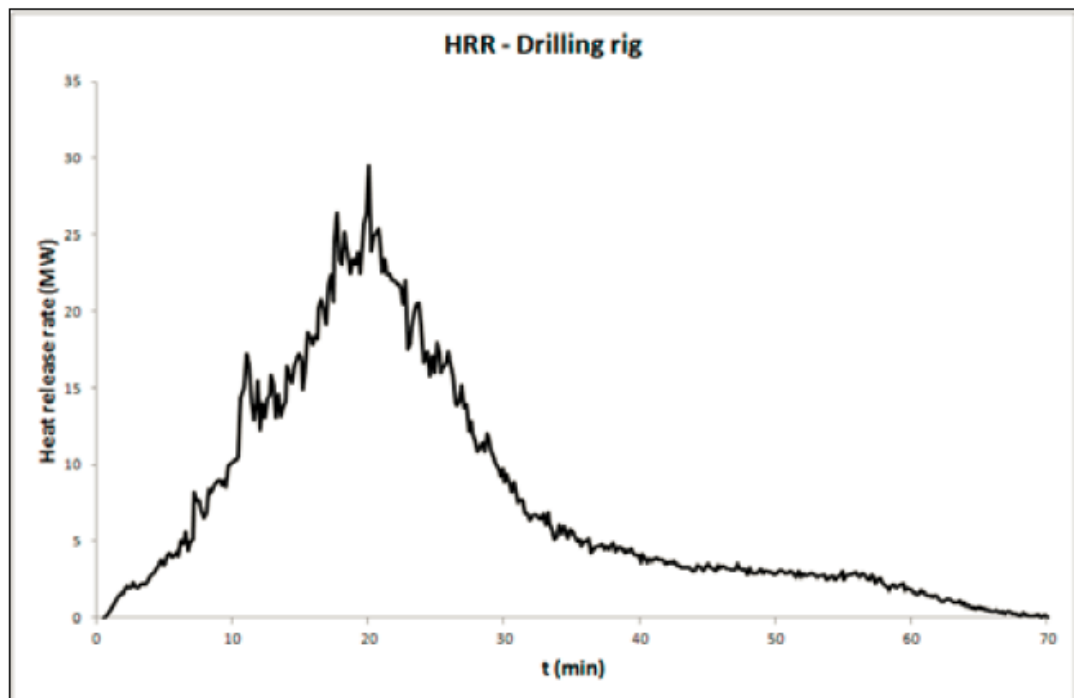
Tunneleissa on käytössä samaan aikaan monenlaisia työkoneita sekä kuorma- ja henkilöautoja. Toiminnallisen tulipalon mallintamisessa on käytetty ruotsissa Mälardalenin yliopistolla Rikhard Hansenin vuonna 2011 tekemän tutkimuksen palotehokäyriä. Pyöräkuormaajan (wheel loader) palotehokäyrä on esitetty kuvassa 3 ja kuvassa 4 on kauhakuormaaja. Poraus jumbon (drilling rig) palotehokäyrä on esitetty kuvassa 5 ja kuvassa 6 on kuva porausjumbosta. Mallinnuksen palotehokäyrä mukailee Hansenin tutkimuksen käyrää ja palotehojen huiput ovat hieman alle Hansenin huippuja. (Hansen 2011, 18.)



Kuva 3. Pyöräkuormaajan palotehokäyrä noin 14 MW (Hansen 2011, 23).



Kuva 4. Pyöräkuormaaja. (Länsimetro).



Kuva 5. Porausjumbon palotehokäyrä noin 24,5 MW (Hansen 2011, 23).



Kuva 6. Porausjumbo.

## 4 TUTKIMUSMENETELMÄT

Henkilöiden liikkumisnopeuksia arvioitiin tekemällä kaksi kokeilua Kivenlahden metro-tunnelityömaalla. Näissä kokeiluissa mitattiin henkilöiden etenemisnopeuksia kahden pisteen välillä. Kokeilun tarkoitus oli selvittää kaltevan pinnan vaikutus etenemisnopeuteen kuljettaessa ylämäkeen. Näiden kokeilujen perusteella saatiin hieman suurempia arvoja kuin FDS+Evac ohjelma ehdotti oletuksena hidastuvuuden kertoimeksi. Näin ollen hidastuvuuden kertoimeksi valikoitui testien perusteella 0,8 ensimmäisen 200 metrin matkalla ja 0,6 viimeisellä 100 metrillä. Ongelmana oli, ettei kaltevan pinnan vaikutuksesta etenemisnopeuteen löytynyt sopivaa materiaalia.

Työ on kolmivaiheinen. Ensimmäisessä vaiheessa kerättiin tietoa palon mallintamista varten ja suunniteltiin simuloitavat case-tilanteet. Mallinnettavan tunnelin korkeus- ja leveysmitat valikoituivat erilaisten louhintatyömaiden tunneleiden (metrotunnelit, Blominmäen jätteenpuhdistuslaitoksen tunnelit) mittojen keskiarvoista..

Toisessa vaiheessa Aalto-yliopiston FDS-simulointikurssin opiskelija simuloi ja mallinnoi palon. Työn lopputuloksen loogisuuden tarkasti Aalto-yliopiston apulaisprofessori Simo Hostikka.

Kolmannessa vaiheessa tulkittiin simuloinneista kirjoitettu Aalto-yliopiston raportti. Raportin perusteella tein esityksen simuloinnin tuloksista ja poistumisen onnistumisesta mallinnetusta tunnelista.

Tutkimusmenetelmänä käytettiin tulipalon ja poistumisen mallintamista FDS+Evac-tietokoneohjelmalla simuloimalla. Ohjelmaan syötettiin lähtöarvoina tunnelin mitat ja mitoituspaloina käytettyjen työkoneiden palotehojen sekä palokuormien arvot. Poistumisen lähtötietoarvoina käytettiin ohjelman vakioarvoa poistumisnopeudesta 1,35 m/s +/- 0,20 m/s ja kenttäkokeella mitattua kulkunopeuden hidastumista ylämäessä (vakioarvo \* 0,8) ensimmäisen 200 metrin matkalla ja (vakioarvo \* 0,6) viimeisen 100 metrin matkalla.

### 4.1 Tutkimusongelma

Tutkimusongelma on tunnelista poistuminen tulipalotilanteen aikana sekä palopaikan ja henkilön sijainnin vaikutus poistumisen onnistumiseen. Tutkimusta on mahdotonta tehdä oikean tulipalon avulla, koska tunneleissa ei ole mahdollista järjestää kenttäkokeita. Tämän vuoksi päädyttiin ratkaisemaan ongelmaa mallintamalla tulipaloa simulaatio-ohjelmalla.

#### 4.2 FDS+Evac tulipalon simulointiohjelma

Tutkimus tehtiin mallintamalla tulipalo umpiperätunnelissa simulointiohjelmalla Fire Dynamics Simulation + Evacuation. Ohjelma on VTT:n käytössä, sekä maailman laajuisesti tunnustettu tulipalojen ja poistumisen mallintamiseen tarkoitettu tietokoneohjelma (FDS+Evac). FDS on niin sanottu ”kenttämalli”, jolla voidaan luoda kolmiulotteinen simulaatioympäristö, jolloin simulaatio on lähellä todenperäisyyttä.

Aalto-yliopisto on ollut mukana tässä työssä tekemässä poistumisen simuloinnin osuuden FDS + Evac-ohjelmalla oppilastyönä simuloinnin kurssilla. Aalto-yliopiston apulaisprofessori Simo Hostikka on simulointikurssin pitäjä, ja hän tarkisti simuloinnin parametrien paikkansapitävyyden. Aikaraja simuloinnille oli 13.4.2016.

Simuloinnissa mallinnettiin maanalaisen louhintatyömaan tunnelissa tapahtuvaa tulipaloa ja sen myötä työnteekijöiden poistumista tunnelista. Tulipalo saa alkunsa työmaalla käytössä olevista työkoneista. Mallinnuksella tutkittiin poistumisen onnistumista umpiperätunnelista tulipalon aikana kolmella erilaisella paloskenaariolla. Mallinnuksessa tutkittiin seuraavia asioita:

- tulipalon ja poistujan sijainnin vaikutusta poistumisen onnistumiseen
- tilojen myrkyllisyyttä FED-arvolla (CO)
- savusta johtuvaa näkyvyyden heikkenemistä (visibility)
- tulipalosta aiheutuvaa lämpösäteilyn määrää seinäpinnoilla ( $\text{kW/m}^2$ )
- poistumisaikoja.

Simulaatitulosten perusteella arvioitiin tulipalon aiheuttaman lämpösäteilyn vaikutusta ihmiseen sekä sitä miten lämpösäteily vaikuttaa poistujiin ja miten poistujan sijainti tulipaloon nähden vaikuttaa poistujan selviytymismahdollisuuksiin.

#### 4.3 Simuloidun umpiperätunnelin tiedot

Simuloinnissa käytettiin tunnelia, jonka poikkileikkauspinta-ala on  $48,96 \text{ m}^2$ , leveys 7,2 m ja korkeus 6,8 m. Tunnelin suulta on 300 metriä laskevaa luiskaa 1:10 ( $1:10 = 5,71^\circ = 10\%$ ) kulmassa ja 300 m vaakasuoraa osuutta, yhteensä tunneli on 600 metriä. Tunnelin poikkileikkauspinta-ala ei ole valittu minkään tietyn tunnelin mukaan vaan se on usean rakenteilla olevan tunnelin keskiarvo.

#### 4.4 Mitoituspalot

Simuloinnissa käytettiin mitoituspaloina porausjumboa ja pyöräkuormaajaa, joiden palot ovat suurimpia oletettuja mahdollisia palotilanteita tunnelissa. Työkoneiden paloteho määriteltiin mukailemaan Rikhard Hansenin vuonna 2015 tekemän tutkimuksen, *Study of heat release rates of mining vehicles in underground hard rock mines*, palotehokäyriä. Porausjumbon paloteho [Q] on simuloinnissa 24,5 MW. Pyöräkuormaajanpaloteho on simuloinnissa 14 MW. Palotehokäyrien lisäksi pitää vielä erikseen selvittää Hansenin tutkimuksen pohjalta työkoneiden kokonaispalokuormat ja eri materiaalien määrät (kg) koneissa sekä näiden materiaalien palokuormat (MJ/kg).

Simuloinnissa simuloitiin kolme eri paloskenaarioita, joissa tulipalo saa alkunsa porausjumbosta (Case 1) ja kauhakuormaajasta (Case 2 ja 3). Simuloinneissa ei ole huomioitu savun ja ilmanvirtausnopeuden vaikutuksia toisiinsa. Poistujat on sijoitettu seitsemään viiden henkilön ryhmää, ja henkilöryhmät aloittavat poistumisen, kun savupatja saavuttaa henkilöryhmän. Henkilöryhmät eivät vaikuta omalla poistumisellaan toisiin henkilöryhmiin. (Kauranen 2016, 6 – 10.)

##### Case 1 – Porausjumbo

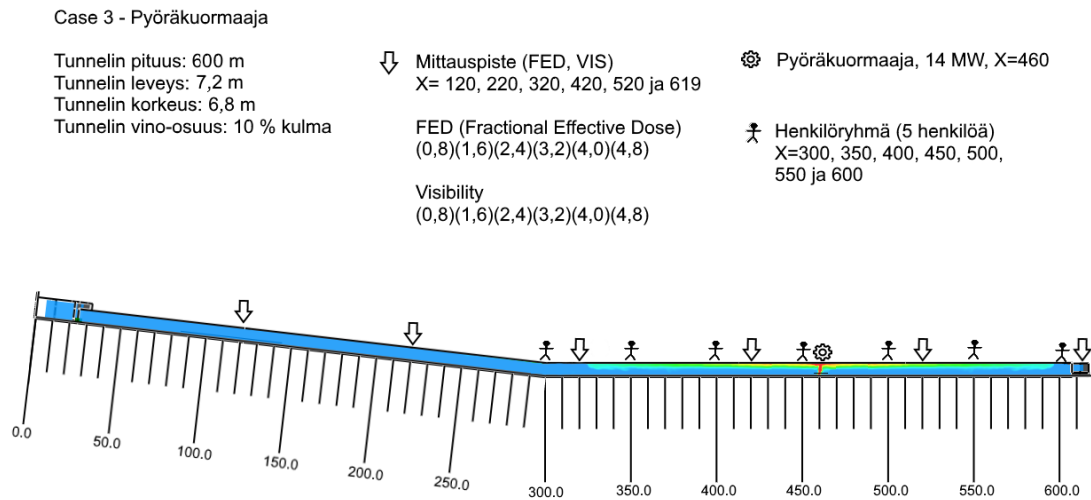
Porausjumbo palaa tunnelin perällä 590 metrin päässä tunnelin suuaukosta. Tunneliin on sijoitettu seitsemän viiden henkilön ryhmää. Kuvassa 7 on kuvattu tunnelin tiedot, henkilöryhmien sijainnit, mittauspisteet ja mitoituspalon sijainti.







Pyöräkuormaaja palaa noin 150 metriä tunnelin perältä. Tunneliin on sijoitettu seitsemän viiden henkilön ryhmää. Kuvassa 9 on kuvattu tunnelin tiedot, henkilöryhmien sijainnit, mittauspisteet ja mitoituspalon sijainti.



Kuva 9. Case 3 - Simuloidun tunnelin havainnekuva.

## 5 SIMULAATIOIDEN TULOKSET

Simulointitulosten perusteella poistuminen tunnelista tulipalon aikana onnistuu silloin, kun henkilö on tunnelin suuaukon ja palavan kohteen välissä. Jos henkilö on palavan kohteen ja tunnelin perän välissä, poistumisen onnistumiseen vaikuttavat palon havaitsemisaika, reagointiaika, poistumismatka, etäisyys palavaan kohteeseen ja palavan kohteen ohittaminen, johon vaikuttaa oleellisesti palon sen hetkinen paloteho (MW) ja palosta aiheutuva lämpösäteily ( $\text{kW/m}^2$ ). Lämpösäteilyn arvoa  $2,5 \text{ kW/m}^2$  pidetään raja-arvona, jota alemmalle lämpösäteilylle paljas iho voi olla altistettuna useita minuutteja, jopa enemmän kuin 5 minuuttia. Yli  $2,5 \text{ kW/m}^2$  lämpösäteilyvuo aiheuttaa kipua, jota seuraa palovammat muutamissa sekunneissa taulukon 1 mukaan. (SFPE, 2-144).

Taulukko 1. Lämpösäteilyn ( $\text{kW/m}^2$ ) vaikutus ihmiseen (SFPE, 2-142 sekä Douglas 2004, 61).

$< 2,5 \text{ kW/m}^2$	Ihminen voi vielä oleilla
$> 2,5 \text{ kW/m}^2$	Aiheuttaa ihon palamista 40 sekunnin jälkeen
$> 6,4 \text{ kW/m}^2$	Aiheuttaa kovaa kipua 8 sekunnin jälkeen
$> 8,2 \text{ kW/m}^2$	Aiheuttaa kovaa kipua 5 sekunnin jälkeen
$> 10,4 \text{ kW/m}^2$	Kovaa kipua 3 sekunnin jälkeen
$> 16 \text{ kW/m}^2$	Aiheuttaa palovammoja muutamassa sekunnissa

Kun palo on kehittynyt tarpeeksi kauan, lämpösäteily, joka on noin  $6,4 \text{ kW/m}^2$ , todennäköisesti estäisi palopaikan ohittamisen ja henkilö jää loukkuun tunnelin perälle. Poistumistilanteissa case 2 ja case 3 poistujat altistuvat palopaikan ohittamisen yhteydessä lämpösäteilylle. Simuloinnin perusteella kriittinen etäisyys palopaikalle tunnelin perältä, milloin poistuminen ei välttämättä onnistu, on noin 140 metriä. Tähän vaikuttaa palon havaitsemisaika. Tunneleiden olosuhteiden takia louhinnan aikana palo todennäköisesti havaitaan vasta silloin, kun savupatja saavuttaa henkilöt.

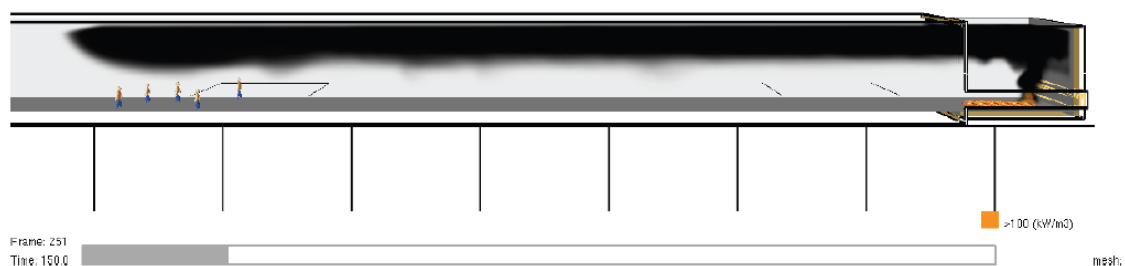
Lisäksi lämpösäteilyn vaikutusta poistujaan arvioitaessa on syytä huomioida työkoneiden mitat. Porausjumbo Sandvik DT1130i ja Tamrock Axera T11 DATA-315 koneiden runkojen pituus on noin 8 metriä ja leveys 2,8 metriä. Pyöräkuormaaja Caterpillar 980x on noin 8 metriä pitkä ja 3,3 metriä leveä. Näiden ohittaminen hyvissä olosuhteissa

normaalilla kävelynopeudella 1,5 m/s kestää noin yli 5 sekuntia. (Caterpillar. 2014, 21; Tamrock. 2002, 1; Sandvik. 2011, 2.)

Henkilöt altistuvat poistuessaan savulle, ja tätä altistusta on mitattu FED-arvolla (Fractional Effective Dose). FED:llä mitataan tulipalon vapauttamia myrkyllisiä happea syrjäyttäviä kaasuja kuten CO (hiilimonoksidi). FED-arvon ollessa 1 katsotaan, että palamiskaasuilla on vakavasti haittaavia vaikutuksia puolelle palokaasuille altistuvista henkilöistä. Poistumissimuloinneissa ei mitattu savukaasujen ärsyttäviä myrkyjä, jotka vaikuttavat oleellisesti poistumisen onnistumiseen. (Weckman 2005, 44).

### 5.1 Poistumistilanne Case 1 – Porausjumbo

Palo sijaitsi tunnelin perällä, ja kaikki henkilöryhmät sijoituivat palon ja tunnelin suuaukon välille kuvan 7 mukaisesti. Ensimmäinen poistuja saavuttaa tunnelin suuaukon ajassa 538 s ja viimeinen ajassa 931 s. Henkilöt aloittivat poistumisen havaittuaan savunpatjan ja reagointivaiheen (10 – 20 s) jälkeen aloittavat poistumisen. Kaikkien henkilöiden kulkunopeus on suurempi kuin savunpatjan kulkunopeus, joten poistuminen tapahtui puhtaissa olosuhteissa. Henkilöryhmällä, joka oli sijoitettuna palon läheisyyteen, kestää 538-705 sekuntia poistua tunnelista poistumismatkan ollessa 600 metriä. (Kauranen 2016, 39.)

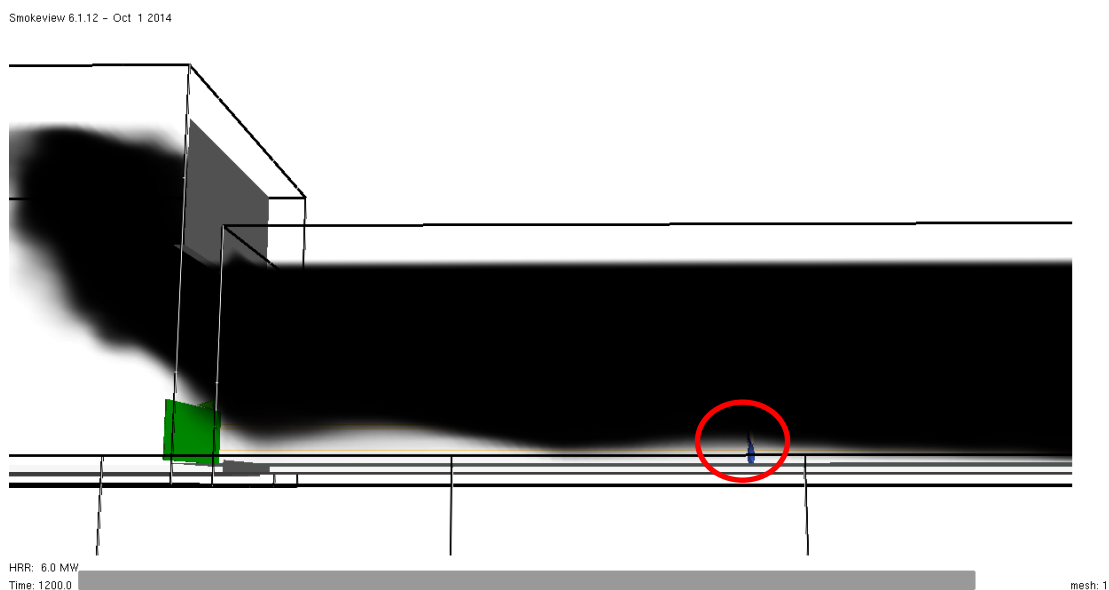


Kuva 10. Poistumisen tilanne 150 s palon alkamisesta.

### 5.2 Poistumistilanne Case 2 – Pyöräkuormaaja

Palo sijaitsi tunnelin luiskan ja tunnelin vaakaosuuden taitekohdassa 300 metriä tunnelin suuaukosta. Henkilöryhmät sijoituivat kuva 8 mukaisesti. Suurin osa henkilöryhmis-

tä oli palon takana tunnelin suuaukkoon nähden. Ensimmäinen poistuja saavuttaa tunnelin suuaukon ajassa 340 s. Simulointi ajan puitteissa (1200 s) yksi henkilö ei ehdi poistua tunnelista, vaan jää noin 20 metrin etäisyydelle suuaukosta, kuva 11. Poistujat altistuvat 0,2:n FED arvolle. (Kauranen 2016, 42.)



Kuva 11. Case 2 – Pyöräkuormaaja. 1200 s palon alkamisesta.

Taulukossa 2 on esitetty poistumisessa mitattuja eri ilmiöiden aikoja, jotka vaikuttavat poistumisen onnistumiseen, sekä paloteho sillä hetkellä, kun henkilöryhmä saavuttaa palopaikan. Kun verrataan taulukoiden 2 (s. 30) ja 3 (s. 31) sarakkeiden ”lämpösäteilyn teho seinäpinnoilla ( $\text{kW/m}^2$ )” arvoja taulukon 1 (s. 28) lämpösäteilyn vaikutusta ihmiseen, saadaan käsitys, millainen lämpösäteilyn teho vaikeuttaa tai estää palopaikan ohittamisen.

Taulukko 2. Case 2 – Pyöräkuormaaja, henkilöryhmien ajat palon alkamisesta, jolloin ryhmät saavuttavat palopaikan, ja paloteho sekä palon aiheuttama lämpösäteily.

Henkilöryhmä	Henkilöryhmän alkusijainnin etäisyys palosta (m).	Henkilöryhmä saavuttaa Palopaikan (s)	Paloteho (MW) silloin kun henkilöryhmä saavuttaa palopaikan	Lämpösäteilyteho seinäpinnoilla (kW/m <sup>2</sup> )
x400	<b>90</b>	<b>190</b>	<b>1,8</b>	<b>alle 6</b>
x450	<b>140</b>	<b>315</b>	<b>4,0</b>	<b>alle 8</b>
x500	<b>190</b>	<b>395</b>	<b>6.1</b>	<b>yli 10</b>
x550	<b>240</b>	<b>495</b>	<b>9,0</b>	<b>yli 10</b>
x600	<b>290</b>	<b>600</b>	<b>13,6</b>	<b>yli 10</b>

Raportin näkyvyyskuvien (visibility) mukaan ajassa 400 s palon alkamisesta palopaikalta tunnelin suuaukolle päin 200 metrin matkalta (130 - 330 metrin välillä) näkyvyys tunnelin lattiasta kattoon on rajoittunut alle 6 metriin. Tämä tarkoittaa sitä, että henkilöiden täytyy poistua savun seassa, jolloin savu itsestään vaikeuttaa poistumista. Lisäksi tunnelissa on todellisuudessa pimeätä, jolloin ilman valaisinta näkyvyys on normaaliolosuhteissakin 0 metriä.

### 5.3 Poistumistilanne Case 3 – Pyöräkuormaaja

Poistumistilanteessa palo sijaitsi tunnelin vaakaosuudella 460 metrin päässä tunnelin suuaukosta. Henkilöryhmät sijoittuivat palon molemmin puolin siten, että kolme henkilöryhmää sijoittui palon taakse tunnelin suuaukkoon nähden. Ensimmäinen poistuja saavuttaa tunnelin suuaukon ajassa 465 s ja viimeinen ajassa 1070 s. Poistujat altistuvat 0,15:n FED arvolle. (Kauranen 2016, 49.)

Taulukossa 3 on esitetty poistumisessa mitattuja eri ilmiöiden aikoja, jotka vaikuttavat poistumisen onnistumiseen, sekä paloteho sillä hetkellä, kun henkilöryhmä saavuttaa palopaikan. Kun verrataan taulukoiden 2 (s. 30) ja 3 (s. 31) sarakkeiden ”lämpösäteilyn teho seinäpinnoilla (kW/m<sup>2</sup>)” arvoja taulukon 1 (s. 28) lämpösäteilyn vaikutusta ihmiseen, saadaan käsitys, millainen lämpösäteilyn teho vaikeuttaa tai estää palopaikan ohittamisen.

Taulukko 3. Case 3 – Pyöräkuormaaja, henkilöryhmien ajat, jolloin ryhmät saavuttavat palopaikan, ja paloteho sekä palon aiheuttama lämpösäteily.

Henkilöryhmä	Henkilöryhmän alkusijainnin etäisyys palosta (m).	Henkilöryhmä saavuttaa Palopaikan (s)	Paloteho (MW) silloin kun henkilöryhmä saavuttaa palopaikan	Lämpösäteilyteho seinäpinnoilla (kW/m <sup>2</sup> )
x500	<b>20</b>	<b>75</b>	<b>0,5</b>	<b>alle 3</b>
x550	<b>70</b>	<b>195</b>	<b>2,0</b>	<b>alle 5</b>
x600	<b>140</b>	<b>310</b>	<b>4,2</b>	<b>alle 8</b>

## 6 POISTUMISEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Poistumiseen ja sen onnistumiseen vaikuttaa muutama kriittinen tekijä: lämpösäteily palopaikalla ja tulipalon savukaasuille altistuminen. Tulipalosta aiheutuva kova yli  $6,4 \text{ kW/m}^2$  lämpösäteily muodostaa esteen palopaikalla. Simuloinnissa ei otettu huomioon savukaasujen ärsyttävyyden vaikutusta poistujiin. Tämän lisäksi tunneleissa on pimeää ja tunnelin lattiassa saattaa olla paikoin vesilätäköitä, kuoppia, isoja kiviä ja muita poistumista haittaavia esteitä. Tunneleissa työskentelevät henkilöt tuntevat tilat hyvin mutta tulipalotilanteessa poistumisen on haastavaa ja henkilön toimintaan vaikuttaa seuraavat asiat (Vähäkoski, 2016):

- tilan tai rakennuksen tuntemus
- tilan koko
- ihmismassat (ei tässä tapauksessa)
- läheisten ihmisten läsnäolo (työtoverit)
- muiden läsnä olevien käyttäytyminen
- päätöksenteon vaikeus
- tilanteen vakavuus havaintohetkellä

Edellä mainitut seikat vaikuttavat henkilön päätökseen aloittaa poistuminen. Henkilö tarvitsee yleensä kolme aistihavaintoa ennen kuin aloittaa poistumisen, näköhavainto, hajuhavainto ja kuulohavainto (palohälytin). Vaikka henkilö kuulisi palohälyttimen, tämä ei yksistään riitä vakuuttamaan henkilöä aloittamaan poistumista. (VTT 2016.)

Poistumisaika ( $t_{\text{crit}}$ ) jakautuu pelkistettynä kolmeen vaiheeseen:

1. havaitsemisvaihe  $t_a$ , aika [s] palon alkamisesta palon havaitsemiseen, jolloin henkilö tulee tietoiseksi palosta (arvio ajasta)
2. reagointivaihe  $t_b$ , aika [s], joka kuluu havaitsemista siirtymisen aloittamiseen
3. siirtymisvaihe  $t_m$ , aika [s], joka kuluu poistumiseen vaarallisesta tilasta turvalliseen tilaan.

Näillä muuttujilla voidaan laskea poistumiseen kulunut aika ja verrata sitä kriittisten olosuhteiden  $t_{crit}$  syntymiseen kuluvaan aikaan, jonka perusteella voidaan arvioida poistumisen onnistumisen mahdollisuutta seuraavan laskukaavan mukaan (RIL 233-2007, 66):

- $t_a + t_b + t_m \leq t_{crit}$

## 6.1 Palokaasujen myrkyllisyys

Simulaatiossa tutkittiin henkilöiden altistumista happea syrjäyttäville myrkyille (CO) FED-arvolla. Henkilöiden altistumista ärsyttäville myrkyille ei arvioitu. Poistumissimulaatiossa ei ehkä olisi niin hyvä lopputulos, jos tämä seikka olisi ollut mahdollista ottaa huomioon.

Myrkylliset palokaasut jaetaan kahteen eri luokkaan, lamaaviin ja ärsyttäviin kaasuihin. Lamaavia kaasuja ovat hiilimonoksidi eli häkä (CO), syaanivety (HCN) ja hiilidioksidi CO<sub>2</sub>. Häkää on runsaasti savussa, ja minkä takia se on merkittävä vaaratekijä tulipalossa. Häkä on väritön, mauton ja hajuton kaasu, joka sitoutuu veren punasolujen hemoglobiiniin 240 kertaa paremmin kuin happi (O<sub>2</sub>). Syaanivety on 20 kertaa myrkyllisempää kuin häkä, ja sekin estää solujen hapettumista. Ihminen sietää 50 ppm:n suuruista HCN-pitoisuutta 30 - 60 minuuttia. 100 ppm:n pitoisuus voi johtaa kuolemaan samassa ajassa. 135 ppm pitoisuus voi johtaa kuolemaan jo 30 minuutissa ja 181 ppm:n pitoisuus 10 minuutin altistumisen jälkeen. Hiilidioksidia on runsaasti savussa. Ihmisen hengitystiheyttä säätelee hiilidioksidin määrä veressä. Hiilidioksidin määrän lisääntyessä veressä hengitystiheys kasvaa, mikä taas johtaa siihen, että henkilö altistuu enemmän kaikille myrkyille. Hiilidioksidin määrän hengitysilmassa ollessa 10 – 20 t-% tai suurempi, on hengenvaara olemassa. (Hyttinen ym. 2007, 53 – 55.)

Ärsyttäviä kaasuja palokaasuissa ovat akroleini, kloorivety (HCl), typpioksidit, rikkidioksidi, ammoniakki, fluorivety, bromivety, isosyanidi, fosforin yhdisteitä ja kevyet hiilivedyt. Kaikki nämä kaasut ovat hengitysteitä ärsyttäviä ja siten vaikeuttavat hengittämistä. Akroleini ärsyttää voimakkaasti silmiä ja aiheuttaa suorituskyvyn laskua jo muutamana ppm:n pitoisuudessa. Kloorivetyä syntyy, kun esimerkiksi PVC-muovia palaa. Kaasu aiheuttaa voimakasta ärsytystä keuhkoissa ja silmissä 75 ppm:n pitoisuuksilla. 700 ppm:n pitoisuuden on arveltu aiheuttavan hengenvaaraa 30 minuutin altistumisajassa.



sa. Typenoksidit NO ja NO<sub>2</sub> syntyvät typpipitoisten aineiden palaessa ja ärsyttävät keuhkoja. (Hyttinen ym. 2007, 53 – 55.)

## 6.2 Savun leviämisenopeus tunnelissa

Laskukaavoissa käytetyt merkit:

- $V = \text{tunnelin tilavuus: } V = Ah$
- $A = \text{tunnelin poikkileikkaus pinta – ala (m}^2\text{)}$
- $h = \text{tunnelin pituus (m)}$
- $v = \text{nopeus (m/s)}$
- $s = \text{matka (m)}$
- $t = \text{aika (s)}$
- $qv = \text{tunnelin puhaltimen tuotto (m}^3\text{/s)}$
- $qv_1 = \text{savun tilavuusvirta (m}^3\text{/s)}$

Savun leviämisenopeus on laskettu ajanhetkellä 300 s kaavalla ( $\frac{s}{t} = v$ ). Savu leviää tunnelissa nopeudella 0,63 – 0,7 m/s. Taulukossa 9 (s. 34) on laskettu jokaisen Case-tilanteen savun leviämisenopeus ajanhetkellä 300 s. Tulos on karkea arvio savun leviämisenopeudesta.

Palon alkuvaiheessa savu leviää tunnelissa nopeudella 0,63 – 0,7 m/s, kun tunnelissa ei vielä ole savua. Savun leviämisenopeus kasvaa palon edetessä. Savun leviämisenopeuteen todellisuudessa vaikuttaa tunnelin perälle siirrettävän puhtaan ilman aiheuttama virtaus tunnelin suuaukolle päin niin pitkään, kunnes työntekijät sammuttavat puhaltimen.

Taulukossa 4 on myös mukana Case 2 - Pyöräkuormaaja ilmanvaihdolla ja arvio siitä, miten ilmanvaihto on simuloinnissa vaikuttanut savun leviämisenopeuteen. Todellisuudessa ilmanvaihto ei vaikuttaisi samalla tavalla kuin simuloinnissa savun leviämiseen, koska palon lämpötila sulattaisi ilmanvaihdon tuuletuslinjan palopaikan yläpuolelta, ja jolloin ilma virtaisi suoraan palopaikan päälle. Tuuletuslinjaston, joka on PVC-pinnoitettua polyesterikudosta, käyttölämpötila on -40 - +70 celsiusastetta. Näin ollen se ei kestä palon aiheuttamaa lämpörasitusta kovinkaan pitkään. Leikkikosketuksesta linjasto sulaa jo, ennen kuin ympäristön lämpötila on kohonnut yli + 70 celsiusasteen.

Taulukko 4. Savun leviämisenopeudet (keskiarvo) Case - tilanteittain.

Paloskenaario	Käsin laskenta $\frac{s}{t} = v$
Case 1 - Porausjumbo	210m/300s = <b>0,7 m/s</b> 600m/780s = <b>0,77 m/s</b> (savu levinnyt koko tunneliin),
Case 2 – Pyöräkuormaaja  [Case 2 – pyöräkuormaaja ilmanvaihdoilla n. 1 m/s]	210m/300s = <b>0,7 m/s</b> (ylämäki osuus) 190m/300s = <b>0,63 m/s</b> (vaaka osuus) 300m/458s = <b>0,65 m/s</b> (savu levinnyt koko tunneliin) [300m/343s = <b>0,87 m/s</b> (savu levinnyt tunnelin suulle)]
Case 3 - Pyöräkuormaaja	200m/300s = <b>0,66 m/s</b> 480m/637s = <b>0,75 m/s</b> (savu levinnyt koko tunneliin)

Esimerkkinä yleisesti käytetyn tunnelipuhaltimen tekniset tiedot, joita on yleensä kaksi puhallin yksikköä:

EVS 160-56-12-90kW Tunneling Fan (puhaltimet 2 kpl):

- tuotto: 30 m<sup>3</sup>/s,
- paine: 1840 kPa
- tuulettimen halkaisija: 1600 mm
- ulostulonopeus: 15 m/s.
- moottorinteho: 90 kW

(Kalliorakennus- Yhtiöt Oy, 2016).

Tunnelin tiedoilla ja puhaltimen tuoton tiedoilla voidaan laskea puhaltimella saatu ilman virtausnopeus tunnelikohtaisesti. Tässä työssä simuloidussa tunnelissa ilmanvirtausnopeus lasketaan seuraavilla kaavoilla:  $\frac{V}{qv} = t \rightarrow \frac{s}{t} = v \rightarrow 48,96 \text{ m}^2 * 600 \text{ m} =$

$$29\,376 \text{ m}^3, \rightarrow \frac{29\,376 \text{ m}^3}{60 \text{ m}^3/\text{s}} = 489,6 \text{ s}, \rightarrow \frac{600 \text{ m}}{489,6} = \underline{1,225 \text{ m/s}}$$

Samaan tulokseen päästään kaavalla:  $\frac{qv}{A} = v \rightarrow \frac{60 \text{ m}^3/\text{s}}{48,96 \text{ m}^2} = 1,225 \text{ m/s}$

Näin ollen simulaatiossa savun leviäminen tunnelissa nopeudella  $0,63 - 0,77$  m/s on hitaampi kuin henkilön liikkumisnopeus simuloinnissa  $1,35$  m/s  $\pm 0,2$  m/s, mikä mahdollistaa sen, etteivät henkilöt altistu savulle Case 1-tilanteessa.

Ilmanvaihdoilla saatu ilman virtausnopeus  $1,225$  m/s on lähes sama nopeus kuin henkilön liikkumisnopeus simuloinnissa. Savu leviää oletetusti ilmanvirtausnopeudella virtauksen suuntaan.

Case 2 – Pyöräkuormaaja + ilmanvaihto-simuloinnissa, jota ei raportissa mainita, on tunnelin perälle sijoitettu puhallin, jolla saadaan tunneliin noin  $1$  m/s ilmanvirtausnopeus suuaukolle päin. Savu leviää noin  $0,87$  m/s, eli tästä voi päätellä, että koneellinen ilmanvaihto nopeuttaa jossakin määrin savun leviämistä. Perälle sijoitettu puhallin hidastaa savun leviämistä vastavirtaan tunnelin perälle päin jonkin verran mutta savu leviää kuitenkin lopulta tunnelin perälle ilmanvaihdosta huolimatta. Tämä sama ilmiö on todettu Mälardalenin yliopistolla ruotsissa The Metro Project-tutkimuksen yhteydessä vuonna 2012. Siinä metrojunan täysimittaisessa poltossa savu leviää tunnelissa yli painetta vastaan. Tosin Ruotsin tutkimuksessa metrojunan paloteho on moninkertainen verrattuna tässä simulaatiossa käytettyihin mitoituspaloihin. (The Metro Project 2012, 89.)

### 6.3 Poistumisnopeus ja savun leviämisnopeus

Poistumisnopeutena on käytetty  $1,35$  m/s  $\pm 0,20$  m/s. Poistumisnopeus on suurempi kuin savun virtausnopeus. Case 1-tilanteessa poistuminen onnistuu simuloinnissa, koska simuloinnissa savun virtausnopeudeksi on saatu  $0,63 - 0,75$  m/s.

Poistumisnopeutena käytetty arvo  $1,35$  m/s  $\pm 0,20$  m/s on FDS+Evac -ohjelman perusoletusarvo ”Male” henkilöprofiilille. Henkilöprofiilin nopeus vastaa parhaiten tunnelityömaalla tehtyjä kulkunopeustestejä. Kulkunopeustesteillä oli tarkoitus selvittää henkilön liikkumisnopeutta ja liikkumisnopeuden hidastumista kaltevalla pinnalla. Hidastuvuuskertoimeksi liikkumiskokeilussa saatiin  $0,82$  sadalla metrillä. Simuloinnissa käytettiin ohjelman kerrointa  $0,8$  ensimmäisen  $200$  metrin matkalla ja  $0,6$  viimeisen  $100$  metrin matkalla. (Kauranen 2016, 14.)

#### 6.4 Kriittiset olosuhteet

Kriittisten olosuhteiden ajankohta vaihtelee case-kohtaisesti. Olosuhteet ovat kriittisiä, kun poistumisen keskeyttää kuumuuden aiheuttamat palovammat, savumyrkytys ja savun määrästä johtuva näkyvyyden heikkeneminen.

Suomalaisissa paloturvallisuuden suunnitteluohjeissa luetellaan poistumisen kannalta kriittisten olosuhteiden raja-arvot. Näkyvyyden osalta tilassa, jossa palo syttyy ja jonka suurin mitta on enintään 10 metriä, saa savukaasujen optinen tiheys olla enintään 3,3 dB/m aina 2 m korkeuteen lattiapinnasta mitattuna. Kun tilan suurin mitta on yli 10 metriä, savukaasujen optinen tiheys saa olla enintään 1 dB/m. Näkyvyyden tulee olla siis 10 metriä, jotta poistumisen voidaan katsoa onnistuvan normaalissa ympäristössä. Tätä arvoa noudatetaan tilanteissa, missä oletetaan, että olosuhteet ovat hyvät ennen tulipaloa. Näkyvyyden ollessa alle 10 metriä katsotaan poistumisen vaikeutuvan merkittävästi valoisissa tiloissa, joissa on savua. Tunneleissa louhinnan aikana ei ole kiinteää valaistusta, jolloin näkyvyys on lähtökohtaisesti 0 metriä ilman valaistusta. (VTT 2016.)

Tarkastelen kriittisten olosuhteiden ajankohtana aikaa, kun savu on tavoittanut tunnelin suuaukon, jolloin savua on jo merkittävästi 1,6 metrin korkeudella ja näkyvyys on rajoittunut alle 3 metriin. Tällöin myös henkilö altistuu savulle. Simuloinnissa savupatjan edellä näkyvyys on alle 30 metriä ja savupatjan alla näkyvyys laskee alle 10 metrin 33 - 84 sekunnissa ja alle 3 metrin 63 – 184 sekunnissa (taulukot 4, 5 ja 6 sivuilla 31 ja 32).

Tämä tarkastelu on tehty tunnelin luiskan nousevalla osuudella, viimeisellä 300 metrin poistumismatkalla, sadan metrin välein, jolloin tunnelissa on vielä henkilöitä poistumassa (taulukko 7). Tässä täytyy myös huomioida simuloinnissa käytetty hilakoko 40 cm \* 40 cm \* 40 cm, joka on suurempi kuin resoluutioparametrin yleisesti suositeltavan arvon 10 mukainen hilakoko, joka on 11,6 cm \* 11,6 cm \* 11,6 cm (Kauranen 2016, 11).

Hilakoon ollessa 40 cm \* 40 cm \* 40 cm mahtuu tunneliin päällekkäin 17 hilaa. Suositeltavalla hilakoolla (11,6 cm) täysikokoisia hiloja olisi mahtunut 58 kappaletta päällekkäin. Tämän takia savu laskeutuu simuloinnissa oletetusti hieman normaalia nopeammin. Pituussuunnassa hilakoolla ei ole samanlaista merkitystä. Simuloinnissa käytetty hilakoko valikoitui laskennalle käytettävissä olleen vähäisen ajan ja laskentatehon takia.

Taulukko 5. Case 1 - Porausjumbo. Näkyvyyden rajoittuminen palon syttymisestä (s) savupatjan tullessa kohdalle.

Etäisyys tunnelin suuaukosta	<b>näkyvyys &gt; 30 m [s]</b>	<b>näkyvyys &lt; 10 m [s]</b>	<b>näkyvyys &lt; 3 m [s]</b>		<b>näkyvyys &lt; 10 m [s]</b>	<b>näkyvyys &lt; 3 m [s]</b>
300 m	434	459	517		25	83
200 m	543	574	590		31	47
100 m	672	714	730		42	58
Keskiarvo:					<b>33</b>	<b>63</b>

Taulukko 6. Case 2 - Pyöräkuormaaja. Näkyvyyden rajoittuminen palon syttymisestä (s) savupatjan tullessa kohdalle.

Etäisyys tunnelin suuaukosta	<b>näkyvyys &gt; 30 m [s]</b>	<b>näkyvyys &lt; 10 m [s]</b>	<b>näkyvyys &lt; 3 m [s]</b>		<b>näkyvyys &lt; 10 m [s]</b>	<b>näkyvyys &lt; 3 m [s]</b>
300 m	87	262	366		175	279
200 m	225	260	368		35	143
100 m	357	400	489		43	132
Keskiarvo:					<b>84</b>	<b>184</b>

Taulukko 7. Case 3 - Pyöräkuormaaja. Näkyvyyden rajoittuminen palon syttymisestä (s) savupatjan tullessa kohdalle.

Etäisyys tunnelin suuaukosta	<b>näkyvyys &gt; 30 m [s]</b>	<b>näkyvyys &lt; 10 m [s]</b>	<b>näkyvyys &lt; 3 m [s]</b>		<b>näkyvyys &lt; 10 m [s]</b>	<b>näkyvyys &lt; 3 m [s]</b>
300 m	295	340	410		45	115
200 m	415	452	502		37	87
100 m	543	573	614		30	71
Keskiarvo:					<b>37.3</b>	<b>91.0</b>

## 6.5 Henkilömäärät tunnelissa näkyvyyden ollessa alle 3 metriä

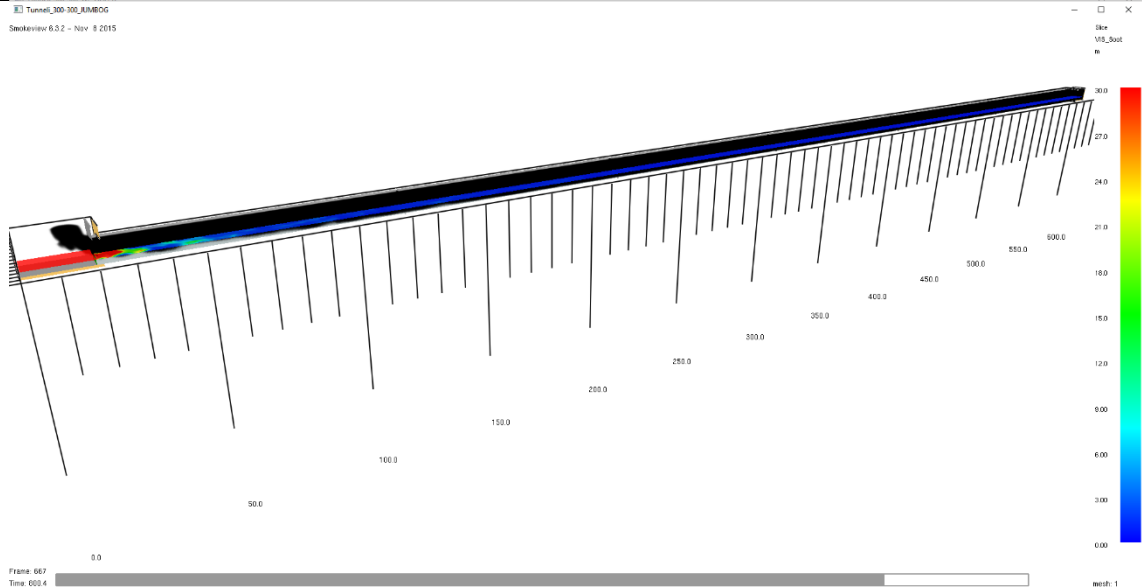
Savun tavoittaessa tunnelin suuaukon aika vaihtelee simuloinneissa 480 - 800 sekuntiin palon syttymisestä, jolloin jokaisessa simuloidussa case-tilanteessa on tunneli kauttaaltaan täynnä savua ja näkyvyys alle 3 metriä. Mikäli tunnelissa olisi jatkuva valaistus niin näkyvyys olisi yli 30 metriä. Valoisissa tiloissa 10 metrin näkyvyyttä pidetään rajana poistumisen onnistumiselle suurissa tiloissa.

Taulukossa 8 on esitetty case-kohtaisesti ajat (s) jolloin ensimmäinen ja viimeinen henkilö on poistunut tunnelista, ja aika (s), jolloin olosuhteet tunnelissa ovat kriittiset poistumisen onnistumisen kannalta. Koko tunnelissa näkyvyys on laskenut alle 3 metrin 1,6 metrin korkeudella, ja savupatja on tavoittanut tunnelin suuaukon, kuva 12, 13 ja 14. Tunnelissa on vain yksi poistumissuunta ja tila on työtekijöille tuttu. Kuitenkin pimeässä ja savussa on mahdollisuus eksyä jo lähtötilanteessa, jolloin poistumissuunta voi olla täysin väärä. Tunnelissa on 35 henkilöä jokaisessa case-tilanteessa.

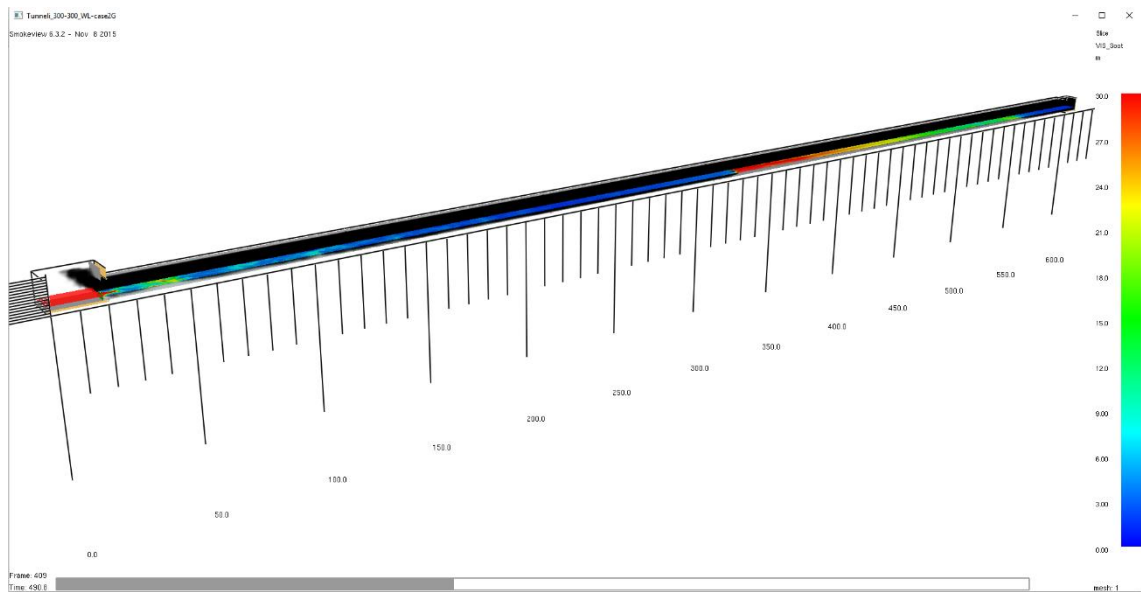
Taulukko 8. Henkilömäärät tunnelissa kriittisen ajan jälkeen.

Case	Ensimmäinen henkilö ulkona tunnelista [s]	Viimeinen henkilö ulkona tunnelista [s]	Kriittinen aika [s], näkyvyys < 3m	Henkilöiden lukumäärä tunnelissa kriittisen ajan jälkeen.
Case 1(kuva 12)	538	931	➤ 800	6
Case 2(kuva 13)	340	1200	➤ 480	23
Case 3(kuva 14)	465	1070	➤ 650	13

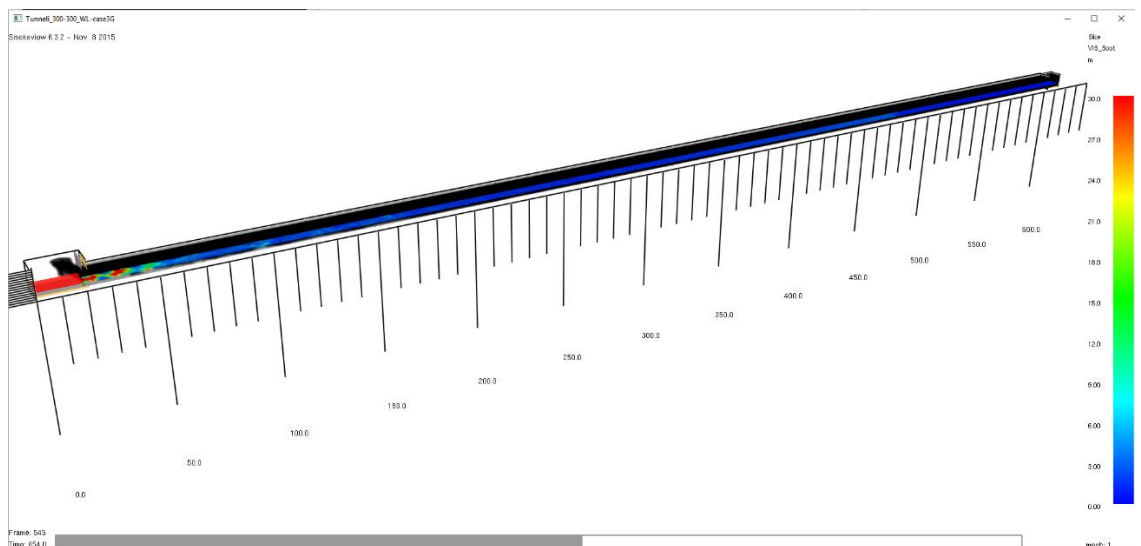
Tunnel\_300-300\_RUMBOG  
Smokeview 6.3.2 - Nov 8 2015



Kuva 12. Case 1 – Porausjumbo. Palopaikka sijaitsee tunnelin perällä. Kriittinen aika 800 s palon syttymisestä koko tunnelissa näkyvyys alle 3 metriä. **Punainen = on yli 30 m, Vaaleansininen = on alle 10 m, Tummansininen = on alle 3 m.**



Kuva 13. Case 2 – Pyöräkuormaaja. Palopaikka sijaitsee 300 metriä tunnelin suuaukolta taitekohdassa. Kriittinen aika 480 s palon syttymisestä koko tunnelissa näkyvyys alle 3 metriä. **Punainen** = on yli 30 m, **Vaaleansininen** = on alle < 10 m, **Tummansininen** = on alle 3 m.



Kuva 14. Case 3 – Pyöräkuormaaja. Palopaikka sijaitsee 140 metriä tunnelin perältä. Kriittinen aika 460 s palon syttymisestä koko tunnelissa näkyvyys alle 3 metriä. **Punainen** = on yli 30 m, **Vaaleansininen** = on alle < 10 m, **Tummansininen** = on alle 3 m.

## 6.6 Lämpötila tunnelissa

Simuloinnin perusteella lämpötila on tunnelissa jokaisessa case-tilanteessa kohonnut lähes koko tunnelin osuudelta vähintään 20 – 40 celsiusasteeseen 1,6 metrin korkeudella. Kohonnut lämpötila vaikeuttaa huomattavasti pelastustehtävän onnistumista. Noin 900 s (15 min) palon syttymisestä lämpötila tunnelissa nousee jokaisessa case-tilanteessa koko tunnelin osalta yli 20 celsiusasteeseen ja kohoaa palopaikka lähestyttäessä.

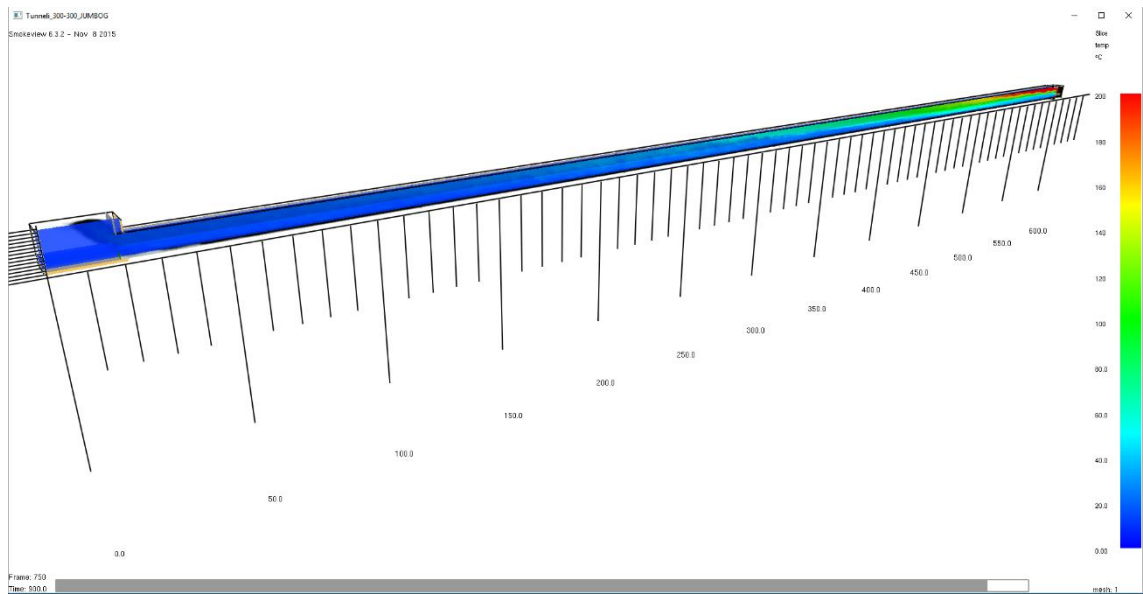
Poistumisen kannalta RIL-221-2007-oppaassa sivulla 58 on annettu ohje arvoksi, että poistuvaan henkilöön kohdistuva lämpötila saa olla enintään 60 celsiusastetta kulkureitillä sen tilan ulkopuolella, jossa palo alkaa. Tilassa, jossa palo alkaa, lämpötila saa olla enintään 100 celsiusastetta ja altistusaika 10 minuuttia, taulukko 9. Case 2:ssa viimeinen poistuja oli tunnelista ulkona 1200 sekuntia palon syttymisestä. Lämpötilan vaikutusta poistujiin ei huomioitu simuloinnissa.

Taulukko 9. Ihmisen lämmönsietokyky rajoja (The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2-145).

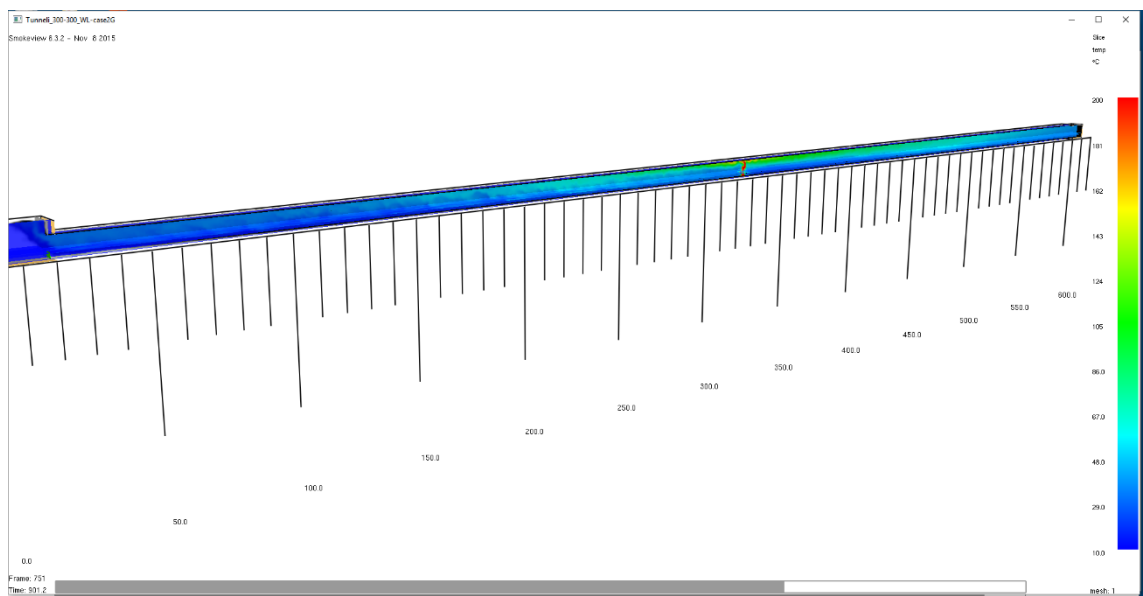
Lämpötila	Sietokyky
< 60 °C	>30 min
100 °C <10 % H <sub>2</sub> O	12 min
120 °C <10 % H <sub>2</sub> O	7 min
140 °C <10 % H <sub>2</sub> O	4 min
160 °C <10 % H <sub>2</sub> O	2 min
180 °C <10 % H <sub>2</sub> O	1 min

Pelastushenkilöstö altistuu tunnelissa kovalle lämpörasitukselle, koska lämpö poistuu tunnelista tunnelin suuaukon kautta, jota kautta myös pelastajat tunneliin menevät. Tunnelissa lämpö ja savu kulkeutuvat pelastajia vastaan koko matkan kuljettaessa kohti palopaikkaa kuvat 15,16 ja 17. Näin lämpösäteily kuormittaa pelastajia koko tunnelissa olon ajan. Normaalisti tulipalotilanteessa pelastaja altistuu palon aiheuttamalle lämpösäteilylle mutta yleensä lämpö pääsee savun mukana pois tilasta jonkin yläpuolisen aukon kautta. Pelastajat joutuvat liikkumaan ja työskentelemään tilassa, jossa lämpötila kohoaa jatkuvasti, ja tunnelin perällä lämpötilan takia on jo sietämätöntä työskennellä.

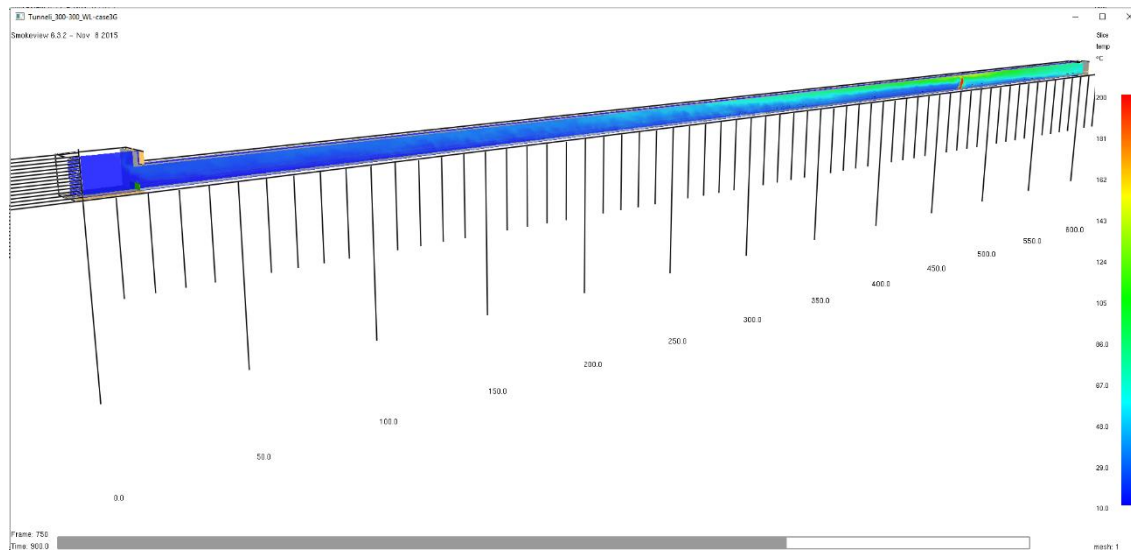




Kuva 15. Case 1 - Porausjumbo. Lämpötila tunnelissa 900 sekuntia palon syttymisestä. **punainen on 200 °C, vihreä on 100 °C, tummansininen on 20 °C.**



Kuva 16. Case 2 - Pyöräkuormaaja. Lämpötila tunnelissa 900 sekuntia palon syttymisestä. **punainen on 200 °C, vihreä on 100 °C, tummansininen on 20 °C..**



Kuva 17. Case 3 - Pyöräkuormaaja. Lämpötila tunnelissa 900 sekuntia palon syttymisestä. **punainen on 200 °C**, **vihreä on 100 °C**, **tummansininen on 20 °C**.

Kun huomioidaan tunnelin olosuhteet ja tulipalon luomat olosuhteet, pelastushenkilöstön ei kannata mennä tunneliin, ellei tiedetä siellä olevan loukussa työntekijöitä jotka voitaisiin vielä pelastaa. Tunneli täyttyy erittäin nopeasti savusta. Simulaatiossa 600 metriä pitkä tunneli on täynnä savua noin 10 minuutin kuluttua palon syttymisestä.

## 7 POHDINTA

### 7.1 Yhteenveto

Simuloidun tunnelin mitat ovat poikkileikkaus pinta-ala 49 m<sup>2</sup>, korkeus 6,8m, leveys 7,2 m ja pituus 600 m, josta 300 m laskevaa luiskaa 1/10 kulmassa. Umpiperätunnelista poistuminen tulipalon aikana onnistuu tämän tutkimuksen mukaan, jos henkilö on tunnelin suuaukon ja palokohteen välissä. Poistumiseen kuluu aikaa 6 – 20 minuuttia. Viimeiset henkilöt ovat ulkona 15 – 20 minuutissa syttymisestä. Jos henkilö on palokohteen takana tunnelin suuaukkoon nähden, riippuu poistumisen onnistuminen seuraavista seikoista:

- henkilön etäisyys palokohteeseen, alle 140 metriä
- palon havaitsemisaika
- palopaikan ohittaminen (palon vaihe (lämpösäteily > 6,4 kW/m<sup>2</sup>)
- henkilösuojausten käyttö (pakohuppu, Escape Hood).

Taulukossa 10 ja 11 on eri henkilöryhmien ajat palon alkamisesta jolloin ryhmät saavuttavat palopaikan ja paloteho sillä hetkellä sekä palon aiheuttama lämpösäteily. Punaisella kehyksellä on merkitty ne etäisyydet, ja lämpösäteilyn arvot, jotka tutkimuksen perusteella on poistumisen onnistumisen kannalta kriittisiä. Taulukossa 12 on punaisella kehyksellä merkitty ne lämpösäteilyn arvot, jotka estävät tutkimuksen mukaan palopaikan ohittamisen. Vihreällä kehyksellä on merkitty arvot, jolloin poistumisen pitäisi vielä onnistua.

Taulukko 10. Case 2 – Pyöräkuormaaja.

Henkilöryhmä	Henkilöryhmän alkusijainnin etäisyys palosta (m).	Henkilöryhmä saavuttaa Palopaikan (s)	Paloteho (MW) silloin kun henkilöryhmä saavuttaa palopaikan	Lämpösäteilyteho seinäpinnoilla (kW/m <sup>2</sup> )
x400	<b>90</b>	<b>190</b>	<b>1,8</b>	<b>alle 6</b>
x450	<b>140</b>	<b>315</b>	<b>4,0</b>	<b>alle 8</b>
x500	<b>190</b>	<b>395</b>	<b>6.1</b>	<b>yli 10</b>
x550	<b>240</b>	<b>495</b>	<b>9,0</b>	<b>yli 10</b>
x600	<b>290</b>	<b>600</b>	<b>13,6</b>	<b>yli 10</b>

Taulukko 11. Case 3 – Pyöräkuormaaja

Henkilöryhmä	Henkilöryhmän alkusijainnin etäisyys palosta (m).	Henkilöryhmä saavuttaa Palopaikan (s)	Paloteho (MW) silloin kun henkilöryhmä saavuttaa palopaikan	Lämpösäteilyteho seinäpinnoilla ( $\text{kW/m}^2$ )
x500	20	75	0,5	alle 3
x550	70	195	2,0	alle 5
x600	140	310	4,2	alle 8

Taulukko 12. Lämpösäteilyn ( $\text{kW/m}^2$ ) vaikutus ihmiseen. (SFPE, 2-142 sekä Douglas, D. 2004, 61).

$< 2,5 \text{ kW/m}^2$	Ihminen voi vielä oleilla
$> 2,5 \text{ kW/m}^2$	Aiheuttaa ihon palamista 40 sekunnin jälkeen
$> 6,4 \text{ kW/m}^2$	Aiheuttaa kovaa kipua 8 sekunnin jälkeen
$> 8,2 \text{ kW/m}^2$	Aiheuttaa kovaa kipua 5 sekunnin jälkeen
$> 10,4 \text{ kW/m}^2$	Kovaa kipua 3 sekunnin jälkeen
$> 16 \text{ kW/m}^2$	Aiheuttaa palovammoja muutamassa sekunnissa

Lämpösäteily ( $> 6,4 \text{ kW/m}^2$ ) muodostaa ohittamattoman esteen palopaikalla kapeassa tunnelissa. Työkoneiden pituus on yli 8 metriä, ja kun palo on kehittynyt riittävän pitkään, lämpösäteily estää palavan työkoneen ohittamisen. Ohittaminen todennäköisesti kestää vähintään noin 8 sekuntia etenemisnopeuden ollessa noin 1-1,2 m/s. Pimeys, savu ja kuumuus hidastavat etenemisnopeutta.

Palokaasujen myrkyllisyys pitää huomioida, kun arvioidaan poistumisen onnistumista tulipalon aikana umpiperätunnelista. Simuloinnissa ei huomioitu palokaasujen myrkyllisyyden vaikutusta henkilöihin. Palokaasut sisältävät lamaavia myrkyllisiä kaasuja, muun muassa hiilimonoksidi eli häkä ( $\text{CO}$ ), hiilidioksidi ( $\text{CO}_2$ ), syaanivety ( $\text{HCN}$ ) ja ärsyttäviä kaasuja, (akroleini, kloorivety ( $\text{HCl}$ ), typpioksidit, rikkidioksidi, ammoniakki, fluorivety, bromivety, isosyanidi, fosforin yhdisteitä) ja kevyitä hiilivetyjä.

Poistumisen onnistuminen riippuu siitä, miten nopeasti palo havaitaan. Aikaisessa vaiheessa havaitun palon tuottama savu ei välttämättä vielä ole laskeutunut alle 2 metriin, jolloin se häiritsee poistumista. Savun laskeutuessa alle 2 metriin näkyvyys heikkenee entisestään pimeässä tunnelissa. Simuloinnin perusteella ollessaan tunnelin suuaukon

puolella palopaikkaan nähden henkilöt pystyvät poistumaan tunnelista altistumatta savulle. Henkilön etenemisnopeus on noin 1,35 m/s +/- 0,20 m/s, savun leviämisenopeus on noin 0,8 m/s. Ilmanvaihto saattaa nopeuttaa savun leviämistä tunnelissa, ja lisäksi ilmavirta sekoittaa savua, jolloin se laskeutuu nopeammin alle 2 metrin korkeudelle. Simuloinnissa ei huomioitu ilmanvaihdon vaikutusta savun leviämiseen.

## 7.2 Tavoitteen saavuttaminen

Tätä työtä tehdessäni jouduin perehtymään louhintatyömaihin ja toimintatapoihin niillä. Työn varsinaisesti käynnistyttyä perehdyin todella moniin tutkimuksiin, joissa käsiteltiin poistumisturvallisuutta, maanalaisia tiloja ja tulipaloa. Simulaatiota suunnitellessani pyrin ottamaan huomioon eri rakennuskohteet ja niiden tunnelien profiilin. Tätä varten minun piti perehtyä eri tunnelityömaiden suunnittelukuviin, muun muassa Länsimetron louhintatyömaat ja Blominmäen jätevedenpuhdistamon tunnelit.

Näiden pohjalta suunniteltiin niin sanottu keskivertotunneli simulaatioon, jonka profiilin mitat ovat lähellä molempia. Palo- ja poistumisskenaarioiden suunnitteluun vaikutti hyvin paljon käytettävissä oleva aika. Aikaa oli käytettävissä muutama kuukausi ja siinä ajassa tehtiin simuloinnin suunnittelu ja simulaatio. Kauranen kirjoitti simulointiraportin ja toimitti sen minulle. Ensimmäisestä raportista ilmeni pieni virhe simulointikoodissa, mikä johti simulaatioiden uudelleen ajamiseen. Tämä oli varsin opettavainen sattumus varmasti molemmille, minulle ja Kauraselle, koska molemmat jouduimme tarkastelemaan työntuloksia uudestaan ja varmistumaan siitä, että simulaation tulokset ovat loogisia. Simo Hostikka hyväksyi simulaation uuden ajon perusteella saadut tulokset ja niiden loogisuuden.

Kauranen esitti simulaation tulokset ja opasti, miten tuloksia tulisi tulkita. Tästä oli suuri apu opinnäytetyön kirjoittamista ajatellen, koska olihan tämä ensimmäinen kerta, kun tein töitä tällaisen työn parissa. Raportin lisäksi tein esityksen simulointiraportin tuloksista, jonka avulla on tarkoitus havainnollistaa tulipalon vaarallisuutta tunneleissa ja palon vaikutusta poistumisturvallisuuteen. Lisäksi esityksessä on peilattu pelastustoimen toimintavalmiusaikaa tulipalon kehittymiseen tässä kyseisessä tapauksessa. Esityksessä tuodaan esille, ettei pelastustoimi tavoita tunnelissa olevaa onnettomuuspaikkaa riittävän nopeasti.

Tämä opinnäytetyö on esitetty Kalliorakennus- Yhtiöt Oy:n työmaamestarille Panu Oikkoselle joka vastaa Kivenlahden metrotunnelin louhinnasta. Hänen opastuksella työtä muokattiin vielä enemmän sellaiseen muotoon, että tunnelilouhinta-alan ihmiset sitä ymmärtäisivät paremmin. Oikkonen piti työn tuloksia tärkeänä osoituksena siitä, että tulipalon riskit täytyy minimoida ja poistumisturvallisuus täytyy ottaa huomioon. Tämän työn tuloksien perusteella todettiin työturvallisuuslain 738/2002 10 § ja valtioneuvoston asetus räjäytys- ja louhintatyön turvallisuudesta 644/2011 3 ja 10 § asettamien vaatimusten olevan niitä asioita, joilla pystyttäisiin ehkäisemään simulaation kaltaisen tilanteen syntymistä.

Suomen rakennusinsinöörien liiton RIL 233-2007 Maanalaisten tilojen paloturvallisuus-suunnittelua ohjaavassa oppaassa on todettu kappaleessa A.4.4.2 Yleisohjeet viidennessä kohdassa, että tilanteissa, joissa kahta poistumisreittiä ei ole olemassa ja tulipalo mahdollisesti sulkisi poistumisreitit, tulee laatia suunnitelma keinoista pelastautua. Suunnitelma voi koostua esimerkiksi paineistetusta tilasta, pelastusajoneuvon (joka kestää tulipalon aiheuttaman kallion lohkeilun seuraukset) käytöstä ja poistumiseen ja suojautumiseen tarvittavista aikalaskelmista. (RIL 233-2007, 41.)

Louhintatyömailla on käytössä erilaisia käytäntöjä riskien kartoittamisesta ja varautumisesta. Esimerkiksi joillakin työmailla on todettu pelastautumisvälineiden läpikäymisen riittävän työmaan perehdytystilaisuudessa. Näissä tapauksissa ei mielestäni ole paneuduttu riittävästi riskien kartoittamiseen. Toivon, että tämän työn tulokset saavat muun muassa urakoitsijat pohtimaan henkilöturvallisuuden toteutumista tässä työssä esitettyjen tuloksien valossa. Tulokset voivat tuntua epätodennäköiseltä mutta toteutuessaan palo voi saada suurta vahinkoa aikaiseksi. Tämä voi olla estettävissä oikeanlaisella varautumisella.

### 7.3 Oma oppiminen

Työn tuloksia lukiessani ja pohtiessani, miten niitä voisi käyttää hyödyksi, olen tullut siihen tulokseen, että työmaiden riskit tulisi selvittää tarkoin ja varsinkin kartoittaa ne riskit, jotka voivat johtaa tulipaloon tunnelissa. Perusteellisen riskianalyysin avulla pystyttäisiin varautumaan paremmin vakaviin tapaturmiin ja mahdollisesti ennaltaehkäistä onnettomuuden syntyminen. Lisäksi oikein tehty riskianalyysi tuo myös oikeusturvaa

silloin, jos jotain sattuu, koska silloin pystytään osoittamaan, että riskeihin on varauduttu ja niiden ehkäisemiseksi on tehty toimenpiteitä.

Hyvä riskianalyysi ja työturvallisuussuunnitelma on toteutuessaan arvokas työkalu. Mikä sitten on riittävää riskien hallintaa. Tämä työ toimii yhtenä osoituksena siitä, että tunnelissa tapahtuvassa tulipalossa poistuminen vaarantuu yllättävän helposti. Tulipalo pitäisi pystyä ennaltaehkäisemään kokonaan ja myös varautua riittävästi siihen, että kun tulipalo syttyy, se saadaan sammutettua tehokkaasti heti palon alkuvaiheessa.

Aivan työni loppusuoralla sain sattumalta tietolähteen, joka olisi pitänyt löytää jo työn alkuvaiheessa. Kyseessä on ruotsin teknisen tutkimuslaitoksen tekemä tutkimus tulipaloista rakenteilla olevissa tunneleissa, *Fire incidents during construction work of tunnels*. Tutkimuksessa tarkastellaan tulipalon seurauksia kahdessa eri tunnelin rakennusvaiheessa, umpiperävaiheessa (before brake trough) ja vaiheessa, kun kaksi umpiperätunnelia yhdistyy (after brake trough). Tutkimuksessa oli myös tehty sarja polttokokeita henkilöautoilla, busseilla, kauhakuormaajien renkailla ja työkoneilla. Lisäksi tutkimuksessa oli tutkittu savun käyttäytymistä ja savun hallintaa erilaisissa tulipaloissa eri rakennusvaiheissa. Tutkimuksessa oli myös käsitelty poistumismatkaa ja poistumisen eri vaihtoehtoja umpiperätunnelissa.

Merkittävä huomio oli pelastuskonttien sijoittelu tunneleissa ja etäisyydet kontteihin. Ruotsin lainsäädännössä AFS 2010:1 Berg- och gruvarbete kohdassa 30 § Kommentarer till enskilda paragrafer, on mainittu pelastuskontin sopivaksi etäisyydeksi 200 – 300 metriä riippuen tunnelin ominaisuuksista. Ingasonin tutkimuksessa mainittiin Tukholman Northern Link projekti, jossa oli käytetty pelastuskontin ja poistumistien etäisyytenä 150 metriä, mikä perustuu kyseisen tunnelin profiiliin. Pienempi profiilisessa tunnelissa etäisyys on lyhyempi kuin tunnelissa, jonka profiili on suurempi. (Ingason, H. ym. 2010, 55, 59).

Poistumiselle tulisi olla vaihtoehto silloin, kun työpiste on mahdollisen palokohteen ja umpiperän välissä, ja etäisyys työpisteeltä palokohteeseen on yli 150 metriä. Tutkimuksen tulokset osoittavat, että kun henkilö on yli 140 metrin päässä palopaikasta, niin palopaikan ohittaminen ei todennäköisesti enää onnistu.

Toisaalta, näin jälkikäteen tämän tutkimuksen lukeminen on paljon antoisampaa, koska tässä vaiheessa oma tietotaso aiheesta on paljon laajempi kuin työtä aloittaessani. Nyt pystyn vertailemaan töiden tuloksia keskenään ja ymmärrän paremmin ympäristöä, josta tutkimus on tehty. Työ itsessään opetti monenlaista kuten suunnittelua, tiedonhankintaa, projektinhallintaa, poistumisturvallisuuden merkityksen, yhteistyötä ulkopuolisten organisaatioiden kanssa sekä turvallisuussuunnittelun tärkeyden ja merkityksen henkilöiden poistumisturvallisuudelle.

#### 7.4 Jatkotutkimusaiheita

Simulointi antoi hyviä tuloksia poistumisesta tunnelista ja työstä jää vielä pohdittavaa myöhemmäksikin. Jatkotyönaiheina olisi hyvä tutkia muiden onnettomuuksien ja riskien selvittämistä ja niiden vaikutusta henkilöturvallisuuteen umpiperätunnelissa. Pelastustoiminnan suorituskykyä olisi hyvä pohtia ajatuksella, miten laajamittaisesta operaatiosta pelastuslaitos pystyy suoriutumaan tunneliverkostoissa huomioiden käytettävissä olevat resurssit. Poistumista voisi mallintaa vieläkin tarkemmin jo olemassa olevien tunneleiden osalta ja etsiä mahdollisia ongelmakohtia poistumisen kannalta työmaakohtaisesti. Näin saataisiin arvokasta tietoa poistumisturvallisuudesta ja pystyttäisiin kehittämään louhintatyöntekijöiden ja pelastajien työturvallisuutta. Simulaatiossa tutkittiin henkilöiden altistumista savussa esiintyville niin sanotuille happea syrjäyttäville kaasuille, mutta vielä pitäisi tutkia miten tulokset muuttuisivat, jos simulaatiossa otettaisiin huomioon savukaasujen ärsyttävät vaikutukset poistujaan. Pelastuslaitoksen näkökulmasta voisi olla kiinnostavaa tutkia savutuletuksen järjestämistä louhintavaiheessa olevista tunneleista.



## LÄHTEET

Caterpillar, 2014. *Caterpillar 980M/982M Pyöräkuormaajat*. Esite.

Drysdale, D. 2004. *An Introduction to Fire Dynamics*. Second edition. University of Edinburgh, UK.

Hansen, R. 2015. *Study of heat release rates of mining vehicles in underground hard rock mines*. Tutkimusraportti. Mälardalen University. Sweden.

Hietaniemi, J. 2007. *Palon voimakkuuden kuvaaminen toiminnallisessa paloteknisessä suunnittelussa*. Tutkimusraportti. VTT.

Hostikka, S., Mikkola, E., Rinne, T., Tillander, K ja Weckman, H. 2005. *Henkilöturvallisuuden kehittäminen maanalaisissa tiloissa paloriskejä pienentämällä*. Tutkimusraportti. VTT-tiedote 2318.

Hyttinen, V., Tolonen, P ja Väisänen, T. 2007. *Palofysiikka*. 5.uusittu painos. Pelastusopisto ja SPEK. Helsinki.

Ingason, H. Lönnemark, A. Frantzich, H. Kumm, M. 2010. *Fire incidents during construction work of tunnels*. SP Technical Research Institute of Sweden.

Kauranen, N. 2016. *Tulipalon ja poistumisen mallintaminen maanalaisen louhintatyömaan tunnelista*. Projektityö. Aalto-yliopisto. Ei julkaistu.

Länsi-Uudenmaan pelastuslaitos 2013. *Case Karhusaari*. Palontutkintaraportti.

Lönnemark, A. 2005. *On the Characteristics of Fires in Tunnels*. Tutkimusraportti. Lund University. Sweden.

Matikainen, V-M. 2007. *Yhteiskäyttötunneleiden riskinarviointi*. Tutkimusraportti. Helsingin kaupunki, kiinteistövirasto. Julkaisu 91/2007.

Kumm, M. 2010. *Rescue operations during construction of tunnels*. Tutkimusraportti. Mälardalen University. Sweden.

Pelastuslaki 379/2011.

RIL 233-2007, 2007. Maanalaisten tilojen paloturvallisuussuunnittelu, Perusteet ja soveltamisohjeet. Suomen rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Helsinki.

Sandvik. 2011-02-16. *Underground Drill Rig. Sandvik DT1130i*. Technical Specification Spec Number 6-9350-E.

Sundström. Escape Hood SR 77-2 SMOKE/CHEM. www-lähde. 10.8.2016. [http://www.srsafety.com/usa/product.aspx?p\\_id=13486](http://www.srsafety.com/usa/product.aspx?p_id=13486)

The Metro Project. 2012. Final report. Mälardalen University. Sweden.

The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 2008. Fourth edition. *Assessment of Hazards to Occupants from Smoke, Toxic Gases, and Heat*. Chapter 6.

Tamrock.. 2002-10-17. *Axera T11 DATA-315*. Technical Description 6-9290-F.

Tuuletussuunnitelma. 2016. *Työ no: 139, LU26 Kivenlahden asema ja ratatunneli, louhintaurakka*. Kalliorakennus- Yhtiöt Oy.

Työturvallisuuslaki 738/2002.

Valtionneuvoston asetus räjäytys- ja louhintatyön turvallisuudesta 644/2011.

VTT, Paloturvallisuussuunnittelun oppimisympäristö. www-dokumentti. [https://proxnetsecure.vtt.fi/fise/simon/Fise/opetusmateriaali/fise\\_etusivu.html](https://proxnetsecure.vtt.fi/fise/simon/Fise/opetusmateriaali/fise_etusivu.html). 30.6.2016.

Vähäkoski, K. 2016. Luentomateriaali. Pelastusopisto. Kuopio.

Weckman, H. 2005. *Henkilöturvallisuuden kehittäminen maanalaisissa tiloissa paloriskejä pienentämällä*. Tutkimusraportti. VTT-tiedote 2319.